

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Mecànica

**MESURA EXPERIMENTAL DE FORCES DE CONTACTE I
CÀLCUL DELS MOMENTS ARTICULARS EN UN CICLISTA**



Memòria i Annexos

Autor:	Ainoa Forcada Barberà
Director:	Gil Serrancolí Masferrer
Co-Director:	Manel Madueño Guerrero
Convocatòria:	Juny 2018

Resum

A causa de la complexitat del sistema musculoesquelètic, determinar les forces de contacte i articulars que intervenen durant qualsevol activitat física, resulta una tasca difícil d'estudiar. En aquest Treball de Fi de Grau en Enginyeria Mecànica es descriu el procediment seguit per realitzar un sistema de captura *low-cost* de les forces de contacte als pedals i al seient d'un ciclista *low-cost*, i posteriorment es realitza l'anàlisi de dinàmica inversa per conèixer els moments articulars.

Mitjançant un sistema d'electrònica format per una placa Arduino DUE i set sensors de força repartits entre el seient i els pedals de la bicicleta, s'han extret els valors de les forces de contacte a un ciclista amateur. Amb dues *webcams* als laterals de la bicicleta s'han registrat els vídeos per obtenir la cinemàtica i posteriorment s'han processat amb l'OpenSim (*software* de biomecànica) per extreure'n els moments articulars. S'ha comprovat el funcionament del sistema amb un ciclista amateur d'1,80 m d'alçada i massa de 72kg. Amb els resultats extrets, s'han realitzat les pertinents comprovacions per veure si eren coherents.

A l'actualitat ja existeixen sistemes de captura però a banda de ser molt cars, no calculen els moments articulars. En el cas d'aquest treball, tot el procediment es considera *low-cost*.

Resumen

Debido a la complejidad del sistema musculoesquelético, determinar las fuerzas de contacto y articulares que intervienen durante cualquier actividad física, resulta una tarea difícil de estudiar. En este Trabajo de Fin de Grado de Ingeniería Mecánica se describe el procedimiento seguido para realizar un sistema de captura *low-cost* de las fuerzas de contacto en los pedales y el asiento de un ciclista, y posteriormente se realiza el análisis de dinámica inversa para conocer los momentos articulares.

Mediante un sistema de electrónica formado por una placa Arduino DUE y siete sensores de fuerza repartidos entre el asiento y los pedales de la bicicleta, se han extraído los valores de las fuerzas de contacto a un ciclista amateur. Con dos *webcams* a los laterales de la bicicleta se han registrado los vídeos para obtener la cinemática y posteriormente se han procesado con el OpenSim (*software* de biomecánica) para extraer los momentos articulares. Se ha comprobado el funcionamiento del sistema con un ciclista amateur de 1,80 m de altura y masa de 72kg. Con los resultados extraídos, se han realizado las pertinentes comprobaciones para ver si eran coherentes.

En la actualidad ya existen sistemas de captura pero aparte de ser muy caros, no calculan los momentos articulares. En el caso de este trabajo, todo el procedimiento se considera *low-cost*.

Abstract

Due to the complexity of the musculoskeletal system, determining the human joint and contact forces exerted during any physical activity is quite difficult. This Final Project in Mechanical Engineering describes the procedure followed to build a system to capture the contact forces on the pedals and the seat of a cyclist and then analyse inverse dynamics to estimate the joint moments.

The values of the contact forces of an amateur cyclist were measured by means of an electronic system consisting of an Arduino DUE plate and seven force sensors distributed between the seat and the pedals of the bicycle,. Videos were recorded to obtain the kinematics with two webcams at the lateral side of the bicycle and subsequently were processed with OpenSim to extract the joint moments. The performance of the system with an amateur cyclist height: 1.80 m, mass: 72 kg, were checked. Pertinent tests were carried out to check if results were consistent with the data captured.

Currently, there already exist several motion capture and force measurement systems but, apart from being very expensive, they do not calculate joint moments. In this project, the entire procedure was considered low-cost.

Agraïments

Al meu tutor, Gil Serrancolí, sense la seva ajuda aquest projecte no hagués estat possible.
Al Gerard, per participar amb tot el que li hem demanat i a la meva família per ajudar-me fins a arribar aquí.

Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	IV
1. PREFACI	1
2. INTRODUCCIÓ	3
2.1. Objectius del treball.....	4
2.2. Abast del treball.....	5
3. ESTAT DE L'ART	7
4. ADQUISICIÓ DE FORCES DE CONTACTE	15
4.1. Material.....	15
4.1.1. Sensors Flexiforce (Tekscan)	15
4.1.2. Arduino DUE i Arduino UNO	16
4.1.3. MATLAB	17
4.1.4. OpenSim	17
4.2. Calibratge de sensors.....	18
4.2.1. Material i procediment	18
4.2.2. Programes MATLAB per realitzar el calibratge.....	20
4.2.3. Comprovació.....	24
4.3. Muntatge del circuit d'electrònica	25
4.3.1. Muntatge del sistema d'electrònica dels sensors	26
4.3.2. Muntatge del sistema de captura de vídeo	27
4.4. Muntatge a la bicicleta	28
4.4.1. Estructures per col·locar els sensors.....	28
4.4.2. Disposició i col·locació dels sensors	32
4.4.3. Unió del muntatge de la bicicleta amb l'electrònica	33
4.5. Adquisició i processament de dades dels sensors de força	34
4.5.1. Adquisició de dades dels set sensors.....	34
4.5.2. Conversió de volts a Newtons.....	36
5. ADQUISICIÓ DE LA CINEMÀTICA	38

5.1.	Sistema de captura d'imatge	38
5.2.	Processament d'imatge	40
6.	DINÀMICA INVERSA	42
7.	RESULTATS	44
7.1.	Calibratge	44
7.2.	Forces de contacte	45
7.3.	Angles articulars	51
7.4.	Dinàmica inversa	53
	CONCLUSIONS	58
	ANÀLISI ECONÒMICA	61
	ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL	64
8.	BIBLIOGRAFIA	65
	ANNEX A	66

1. Prefaci

El present Treball de Fi de Grau, correspon al Grau en Enginyeria Mecànica impartit a l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (EEBE) té com a títol "*Mesura experimental de les forces de contacte i càlcul dels moments articulars d'un ciclista*". S'inclou en la línia d'investigació sobre models de contacte del grup SIMMA Lab (*Simulation and Movement Analysis Lab*) del departament d'Enginyeria Mecànica.

L'origen del treball sorgeix de l'interès per part de l'autora de connectar dos mons diferents, el de l'enginyeria i el de l'esport. A causa de l'afició inculcada pel pare d'aquesta des de ben petita per l'esport, en concret pel ciclisme, es tenia la intenció de fer un treball relacionat amb aquesta temàtica.

El tutor del treball va fer diverses propostes i una d'elles va ser completar un treball realitzat al juny de l'any 2017 per una estudiant d'Enginyeria Mecànica i que porta per títol "Estimació de les forces musculars en pedalar". Les forces externes que es van utilitzar en aquest cas van ser forces estimades, a partir d'un model de components principals, no mesurades experimentalment sobre un subjecte. És per això que s'ha decidit mesurar de forma experimental les forces que s'exerceixen als pedals i al seient en el moment de la pedalada. Aquesta informació permet fer una anàlisi inversa per calcular les forces articulars i a partir d'aquest punt permetria estimar les forces musculars per cada subjecte específic.

2. Introducció

La cinesiologia es dedica principalment a l'estudi del moviment humà des del punt de vista de les ciències físiques. Aquesta pot subdividir-se amb tres àrees principals: biomecànica, anatomia musculoesquelètica i fisiologia neuromuscular.

Aquest treball es centra en la branca de la biomecànica que es defineix com la ciència interdisciplinària que estudia els fenòmens cinemàtics i dinàmics que presenten els éssers vius considerats com sistemes complexos.

El cos humà és un sistema d'una complexitat molt elevada. De manera simplificada, l'esquelet és el marc rígid que li dona al cos l'estructura de suport. El sistema esquelètic és passiu per si sol. El que fa que es mogui és la contracció i relaxació dels músculs connectats a aquest per mitjà dels tendons. Tot i que són els músculs els que fan que l'esquelet es mogui, l'origen dels moviments es troba al cervell, el qual es connecta a totes les parts del cos a través del sistema nerviós.

Per analitzar el moviment humà s'han de realitzar una sèrie de simplificacions per tal de poder estudiar-lo. Les simplificacions, es basen en considerar el cos com una agrupació de segments rígids que interaccionen amb el medi. Aquesta simplificació permet obtenir la cinemàtica i la dinàmica del cos humà i dona solució a incògnites plantejades pel moviment humà.

En el món del ciclisme, a part de tenir en compte l'ergonomia i els estudis biomecànics, que realitzen periòdicament els ciclistes, ja fa uns anys que es va començar a entrenar pel que es coneix com l'entrenament per watts.

L'entrenament per watts és una forma d'entrenar relativament nova. No consisteix en arribar a desenvolupar un determinat nombre de watts igual per tothom, sinó que l'important és saber la relació watts/quilogram de cada persona. S'han de determinar els límits de potència mitjançant un test que es fa a centres mèdics.

Aquest tipus d'entrenament ha anat guanyant terreny a l'hora de preparar proves específiques i sobretot a l'elit del ciclisme. S'ha vist que les pulsacions són un indicador variable, perquè depenen de molts factors diferents, per exemple es poden veure influïdes

per les condicions meteorològiques amb les que s'està entrenant aquell dia. La potència en canvi, és un paràmetre que no depèn de causes externes i permet fixar una potència objectiu individualitzada per cada persona que sabem que es pot mantenir durant tot l'entrenament per aconseguir el màxim rendiment possible. En conseqüència, cada cop més ciclistes es doten d'aquest tipus de sistemes, ja sigui perquè estan preparant una prova exigent o perquè volen millorar el seu estat físic d'una forma significativa.

El moviment humà que s'analitza en aquest estudi és el pedaleig d'un ciclista. Es volen conèixer les forces de contacte que es generen en realitzar aquest moviment a partir de les dades que s'adquireixen de forma experimental al SIMMA Lab, mitjançant un sistema de sensors de força muntat en una placa Arduino DUE, i capturant i processant les dades amb MATLAB. Aquestes mesures permetran tenir les forces externes principals que rep un ciclista. Per tant, si es coneix la cinemàtica del moviment, es podran calcular les forces i moments articulars mitjançant l'anàlisi dinàmica inversa.

2.1. Objectius del treball

L'objectiu general d'aquest treball és mesurar les forces de contacte als pedals i al seient d'un ciclista i posteriorment realitzar l'anàlisi de la dinàmica inversa.

Els objectius específics són els següents:

- Desenvolupar el muntatge del circuit que permet l'adquisició de dades amb Arduino.
- Desenvolupar el codi MATLAB que captura i processa les dades.
- Realitzar el calibratge dels sensors.
- Realitzar el muntatge del sistema d'adquisició de dades sobre els pedals i el seient.
- Adaptar el muntatge al ciclista durant el pedaleig.
- Adquisició de les dades.
- Estudiar la cinemàtica.
- Realitzar la dinàmica inversa.
- Discussió de resultats.

2.2. Abast del treball

En aquest projecte s'estudien les forces de contacte al pedal i al seient d'un ciclista de forma experimental. La majoria de sistemes de mesura del mercat utilitzats en l'entrenament es limiten a mesurar la potència mecànica total (entre les bieles dels pedals i el quadre de la bicicleta). A diferència dels mesuradors de potència que es comercialitzen actualment, aquest treball va un pas més enllà i es realitza un estudi dels esforços articulars produïts a la pedalejada. En aquest treball s'arriba a mesurar les forces de contacte entre els pedals, el seient i el ciclista, i també la cinemàtica, per tal de realitzar l'anàlisi de la dinàmica inversa sobre el ciclista i obtenir els moments articulars.

Pel que fa al treball de camp del projecte, s'ha desenvolupat tot el sistema de captura de dades, des de la recerca dels sensors de força que s'utilitzen fins a l'adaptació del sistema a la bicicleta i al ciclista, passant pel muntatge del sistema d'electrònica. S'ha ideat un sistema amb plataformes de fusta per col·locar-hi els sensors i també s'ha hagut de valorar una bona forma per implantar tot el sistema al ciclista mentre pedaleja sobre un rodet.

3. Estat de l'art

Actualment es poden trobar nombroses publicacions relacionades amb la biomecànica de qualsevol esport. És una ciència que ajuda de forma representativa a millorar el rendiment de qualsevol esportista. Tal i com s'ha indicat prèviament, una forma bastant acurada de comprovar en quines condicions es troba el ciclista és mesurant quina potència genera en pedalejar (Figura 3.1.). És per això que s'ha invertit en investigació, i desenvolupament d'aparells i eines que ajuden a comprovar quin és l'estat de forma de l'atleta en qüestió.



Figura 3.1. Estudi biomecànic de ciclisme.

Els components de la bicicleta han canviat molt al llarg dels anys per tal de minimitzar les forces resistives i l'energia consumida en pedalejar amb la intenció de millorar el rendiment. A l'actualitat hi ha nombroses marques que comercialitzen mesuradors de potència. Hi ha diferents formes de mesurar la potència, a continuació s'expliquen les més habituals.

El primer mesurador de potència data de finals dels anys 80. Ulrich Schoberer fundador de la marca SRM, va ser el primer en dissenyar un sistema per mesurar la potència desenvolupada per un ciclista durant el pedaleig (SRM; Jülich, Welldorf, Alemanya). Fins aquell moment els ciclistes només tenien la possibilitat de conèixer la potència en un laboratori. No tenien l'opció d'entrenar amb aquelles dades com a referència i només les utilitzaven durant la temporada per comprovar l'estat de forma física que tenien. El càlcul de la potència es realitza multiplicant el moment per la velocitat angular. El sistema

consisteix en un torquímetre (Figura 3.2.) que mesura el moment produït pel ciclista entre els pedals i el quadre de la bicicleta i un sistema que mesura la velocitat angular.



Figura 3.2. Primer mesurador de potència desenvolupat per SRM.

Actualment, hi ha moltes opcions per mesurar de potència. No obstant, no totes s'han pogut comercialitzar com la que s'explica tot seguit. L'any 2016, una companyia finançada amb *Crowdfunding* va presentar al mercat un mesurador de potència que es col·locava a la sabata del corredor. Constava de dos sensors que mesuraven potència i cadència. El sensor de potència es col·locava entre la sola de la sabata i el pedal de la bicicleta. L'objectiu d'aquest sistema de mesura de potència és que es mesurés la força de contacte que s'exercia entre el taló i el pedal (Figura 3.3.). El sensor de cadència es col·locava a la part superior de la sabata mitjançant una tira elàstica. Té l'avantatge de poder-lo utilitzar a totes les bicicletes perquè que anava integrat a la pròpia sabata.



Figura 3.3. Mesurador de potència situat a les sabatilles desenvolupat pels Brim Brothers.

Més coneguts són els mesuradors de potència als eixos dels pedals. En aquest cas, l'electrònica està integrada al pedal i mesuren la flexió de l'eix del pedal durant el pedaleig i compara la flexió calibrada i predeterminada des de la fàbrica, la qual cosa permet determinar la força que s'aplica a cada pedalada. Porta integrat un acceleròmetre que calcula la cadència, que juntament amb el temps, permet conèixer la potència. Funcionen amb piles i es comuniquen als microprocessadors mitjançant Bluetooth. És molt senzill fer el muntatge, no depenen de cap altre component de la bicicleta, ja que la rosca de la biela al pedal és universal (Figura 3.4.). En aquest cas, també es podria integrar a qualsevol bicicleta amb una certa facilitat.



Figura 3.4. Mesurador de potència als pedals.

Existeixen també els mesuradors de potència ubicats a les bieles. Són exactament iguals a la biela que incorpora una bicicleta de sèrie però porten una peça adherida que conté una galga extensomètrica i l'electrònica que envia les dades a un dispositiu (Figura 3.5.). Aquestes bieles generalment es munten a la part esquerra de la bicicleta, ja que els plats del canvi de marxes no es troben ubicats en aquesta part i això facilita el muntatge. Aquest sistema mesura tant el moment que es produeix en aplicar força al pedal com també la cadència de pedaleig (velocitat angular). La potència s'obté multiplicant el moment per la velocitat angular. Aquests mesuradors de potència són bastant utilitzats per equips professionals ja que, s'afegeix molt poc pes a la bicicleta.



Figura 3.5. Mesurador de potència a la biela esquerra.

Si es segueix avançant en la cadena de transmissió, es troben els potenciòmetres a l'aranya¹. Aquests tipus de potenciòmetres mesuren la torsió amb un extensòmetre que es situa dins de l'aranya (Figura 3.6.). Aquests necessiten unes bieles específiques, amb la qual cosa s'ha de comprovar la compatibilitat de les bieles amb l'aranya que porta el sistema de mesura integrat. Aquest tipus de mesuradors de potència també són molt utilitzats al ciclisme professional, en aquest cas per la seva fiabilitat.

¹ L'aranya d'una bicicleta forma part de la biela dreta (vista des de dalt de la bicicleta), són els cinc punts d'ancoratge de la biela amb el plat. Rep el nom d'aranya per la seva forma.



Figura 3.6. Mesurador de potència a l'aranya.

El següent tipus de mesurador de potència que es troba està situat a l'eix que uneix les dues bieles de la bicicleta (Rotor, Aljafir, Espanya). Aquests, mesuren els moments que es produeixen a l'eix entre les dues bieles mitjançant torquímetros. Són els més resistents als cops, als canvis bruscos de temperatura i la brutícia, ja que no estan exposats d'una forma directa al medi. És el més indicat per poder-se utilitzar en diferents modalitats de bicicletes ja que està protegit pel quadre de la bicicleta (Figura 3.7.). Per exemple, en modalitats de muntanya la brutícia i els cops són molt més freqüents i aquest sistema permet evitar que el mesurador pateixi.



Figura 3.7. Mesurador de potència a l'eix que uneix les dues bieles.

L'últim tipus de mesuradors de potències que existeixen fins l'actualitat són els que estan situats a l'eix posterior com es pot apreciar a la Figura 3.8., només hi ha un únic fabricant per aquest tipus de mesuradors de potència, PowerTap (CycleOps, Madison, USA). El sistema de mesura és igual que l'anterior (potència igual a moment per velocitat angular). Es mesura la velocitat angular de l'eix posterior, que permet calcular la cadència, i també la potència (conegut el moment aplicat), i distància recorreguda. Tot i això, la presa de dades a l'eix posterior és lleugerament inferior a la mesura a l'eix del davant perquè hi ha pèrdues durant la transmissió.



Figura 3.8. Mesurador de potència situat a l'eix posterior.

Hi ha alguns estudis realitzats a nivell experimental, que desenvolupen nous sistemes d'adquisició de dades de potència al ciclisme o de les forces de contacte com és el cas d'Ericsson i Nisell, que l'any 1988 van publicar un estudi anomenat "*Efficiency of pedal forces during ergometer cycling*" [1]. L'objectiu era registrar les forces aplicades al pedal durant el pedaleig en una bicicleta ergomètrica i calcular l'efectivitat d'aquests vectors de força. El moviment de les extremitats inferiors es va registrar mitjançant una càmera de *cinema* i les forces de reacció del pedal amb un transductor de mesura de la força Kistler (Kistler, Winterthur, Switzerland), muntat al pedal esquerre. L'efectivitat de la força es va calcular com una relació entre la força tangencial en la direcció instantània del moviment del pedal i la força resultant. Aquesta va augmentar de forma considerable per un augment de la càrrega de treball de l'ergòmetre.

L'any 2007, a l'*International Journal of Sports Medicine*, un grup d'enginyers van publicar un estudi anomenat "*Development and evaluation of a new bicycle instrument for*

measurements of pedal forces and power output in cycling" [2] on desenvolupaven un instrument que permetia mesurar les forces als dos pedals i, juntament amb la velocitat angular, calcular la potència mecànica. Es basa en uns transductors de força, utilitzant l'efecte Hall que es munten entre el pedal i la biela. Es van realitzar proves dinàmiques per valorar els resultats amb la referència dels obtinguts amb el sistema d'SRM. Amb l'error mitjà que va resultar pels paràmetres valorats, es va concloure que els resultats obtinguts eren vàlids.

L'any 1988, a l'*Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, es va publicar un estudi que portava per nom "*Muscular activity during ergometer cycling*" [3], l'objectiu era quantificar l'activitat registrada per electromiografia durant el ciclisme de forma ergomètrica en onze músculs diferents del tronc inferior. Es van fer proves amb diferents càrregues de treball, velocitat de pedaleig, alçada del seient i variant la posició del peu al pedal. Els músculs més actius en el pedaleig van ser el vast mitjà i lateral, els bessons i el soli. L'augment de la càrrega de treball va augmentar significativament la mitjana de l'activitat màxima en tots els músculs investigats. L'augment de la velocitat va augmentar al glutis major i mitjà, al vast mitjà i als bessons. Un augment de l'alçada del seient va augmentar l'activitat muscular al glutis mitjà i als bessons. Un canvi de posició del peu al pedal va augmentar l'activitat al glutis mig al recte femoral i va disminuir l'activitat del soli.

En un article de revisió de diferents estudis anomenat "*Model-based estimation of muscle forces exerted during movements*" [4], s'explica que el mesurament directe de les forces musculars no és factible, en general en un entorn clínic, com a conseqüència cal considerar mètodes no invasius basats en el modelatge musculoesquelètic. Els parells congènits resultants es poden estimar de manera fiable a partir del moviment i les forces externes (mitjançant dinàmica inversa). Cap d'aquests, però, s'ha introduït a la pràctica clínica de forma correcta, degut a la manca d'estudis que informen de la validació exitosa de les estimacions de les forces musculars i d'un programari informàtic fàcil d'utilitzar i eficient. Els avenços recents en els mètodes de dinàmiques avançades han obert noves oportunitats.

L'article mencionat conclou que les aplicacions clíniques de les investigacions actuals s'haurien de potenciar, millorar el desenvolupament d'eines informàtiques i incrementar la recerca de nous algorismes per a l'estimació de la força muscular i la seva validació.

Els sistemes per mesurar la potència que hi ha a l'actualitat es limiten a mesurar el valor amb watts que exerceixes durant el pedaleig. S'ha comprovat que al llarg de la història s'han fet alguns càlculs i estimacions de les forces de contacte i dels esforços musculars. En aquest treball es fa un estudi complet: es mesuren les forces de contacte i es fa una estimació aproximada dels esforços musculars intentant integrar tot el sistema en una qualificació *low-cost*.

4. Adquisició de forces de contacte

En aquest apartat es detallen els passos i procediments que s'han seguit per portar a terme l'adquisició de les forces de contacte al pedal esquerre, al pedal dret i al seient de la bicicleta.

4.1. Material

Per realitzar l'estudi s'han emprat diferents tipus de materials, *software*, plaques, sensors i diferents elements necessaris per realitzar el mesurador de potència i la dinàmica inversa. En aquest apartat es detallen els components i programaris principals utilitats.

4.1.1. Sensors Flexiforce (Tekscan)

Es tracta d'un sensor resistiu integrat en una membrana d'un circuit imprès flexible d'un gruix molt petit (0,127mm). El sensor és completament pla, això permet posar el sensor entre dues superfícies completament planes i analitzar la mecànica dels elements del sistema i mesurar la força que s'aplica sense afectar a la dinàmica de les proves realitzades.

Els sensors FlexiForce (Tekscan, South Boston, MA, USA) (Figura 4.1.) utilitzen un sistema basat en la variació de la resistència elèctrica de l'àrea sensora. En el moment que s'aplica una força a l'àrea activa de detecció del sensor es tradueix en un canvi a la resistència elèctrica de l'element sensor de forma inversament proporcional a la força aplicada.

Per realitzar aquest treball s'han utilitzat set sensors FlexiForce model A201 que poden suportar fins a 445 N (Taula 4.1.). Els sensors estan repartits de la següent forma: dos sensors al pedal esquerre, dos sensors al pedal dret i tres al seient.

Llargada del suport del sensor	190,5mm
Diàmetre sensor	9,7mm
Rang de temperatura	-40°C a 60°C

Taula 4.1. Especificacions tècniques dels sensors FlexiForce A201.



Figura 4.1. Sensor FlexiForce model A201 de Tekscan.

4.1.2. Arduino DUE i Arduino UNO

Una placa Arduino (Arduino; Minneapolis, Minnesota), conté un microcontrolador amb diverses connexions d'entrada i de sortida (analògiques i digitals). A través de llenguatge de programació de codi obert, s'interpreta la informació (es processen les dades) i es decideix quines accions prendre com a resposta. Finalment per mitjà de les connexions de sortida, en funció de l'algorisme que s'ha escrit, es donen unes ordres al microcontrolador, i aquest donarà unes senyals de resposta (analògiques o digitals) a l'exterior. Per tant, es pot modificar la resposta a actuadors analògics o sistemes digitals perifèrics.

La placa Arduino DUE (Figura 4.2.) consisteix en un microcontrolador basat en la CPU Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3. Consta de 54 pins d'entrada i sortida digitals, 12 d'entrada analògics i 2 de sortida analògics. Es connecta a l'ordinador mitjançant un cable USB i d'aquesta forma es transfereixen les dades. En el cas d'aquest projecte l'Arduino DUE s'ha utilitzat per rebre dades de l'exterior. S'han connectat els set sensors als pins analògics que conté la placa.

L'Arduino UNO (Figura 4.3.) consta d'un microcontrolador basats en l'ATmega328P. Compta amb 14 pins digitals d'entrada i sortida, i 6 d'analògics d'entrada. Es pot connectar també a l'ordinador mitjançant un cable USB. En aquest cas, l'Arduino UNO s'ha utilitzat per sincronitzar les dades del vídeo del moviment amb les mesures de força als pedals. L'Arduino UNO (connectat al PC que captura les dades d'una *webcam*) envia un

impuls elèctric (*trigger*) a l'Arduino DUE (on es reben les dades dels sensors) per tal que es pugui conèixer en quin instant de temps s'han començat a gravar les dades del vídeo del moviment.

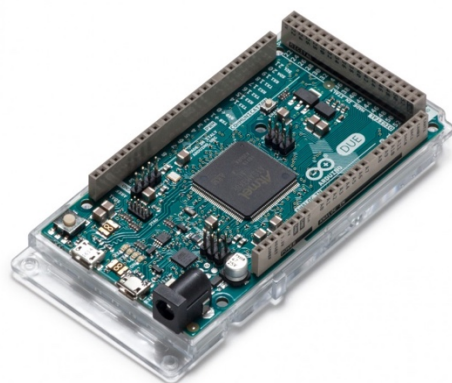


Figura 4.2. Arduino DUE



Figura 4.3. Arduino UNO

4.1.3. MATLAB

El *software* de computació numèrica MATLAB (MATLAB, Natick, MA, USA) s'ha utilitzat per processar totes les dades obtingudes amb els assajos realitzats al SIMMA Lab. És un dels principals entorns de treball que s'han utilitzat per portar a terme aquest projecte.

Per poder realitzar el treball s'han fet servir dos *toolboxes*¹, un per fer la comunicació amb l'Arduino (per poder enviar i rebre dades) i un altre per comunicar-se i poder llegir informació de les *webcam* utilitzades per registrar el moviment.

4.1.4. OpenSim

L'OpenSim és un *software* de biomecànica que permet la modelització de qualsevol sistema basat en sòlids rígids, el càlcul de la cinemàtica i dinàmica inverses, així com també

¹ Un *toolbox* és un grup d'instruccions amb una finalitat comuna. En aquest cas per exemple, s'ha desenvolupat un grup de funcions per processar imatges.

permetria obtenir una estimació de les forces musculars [5]. El motor dinàmic multi-sòlid (*dynamics engine*) que utilitza és el Simbody [6], que és qui realment calcula la informació provinent de les equacions del moviment.

El programa de codi lliure s'ha utilitzat per realitzar l'anàlisi dinàmica inversa i calcular els moments articulars del ciclista a partir dels angles articulars i de les forces de contacte entre ciclista i bicicleta, i també per visualitzar el moviment del pedaleig.

4.2. Calibratge de sensors

La magnitud que interessa calcular per realitzar el projecte és la força, però els sensors varien la resistència en funció de la força exercida sobre aquests, i la magnitud que es llegeix és el voltatge als extrems d'aquests. És per això que va sorgir la necessitat de realitzar el calibratge d'aquestes resistències variables. Per saber a quin valor de força equival cada voltatge es necessita la corba de calibratge. Als següents subapartats es detalla com es va extreure aquesta corba.

La idea principal d'aquest projecte és que sigui un mesurador de potència *low-cost*. És per aquest motiu que a l'hora de fer el calibratge dels sensors no es va utilitzar cap dinamòmetre ni cap aparell similar que pogués excloure el treball d'aquesta qualificació. En aquest apartat es detallen els materials, els programes utilitzats i el procediment seguit per realitzar el calibratge dels sensors.

4.2.1. Material i procediment

Per portar a terme el calibratge dels sensors s'utilitzen cinc garrafes d'aigua de vuit litres, un palet de fusta i una bàscula, i els propis sensors. El procediment de calibratge dels sensors es porta a terme amb garrafes d'aigua de 8 l, ja que és una forma molt econòmica i senzilla de saber quant pesen les càrregues que s'afegeixen a sobre el sensor. La funció que té el palet és fer de suport per anar afegint d'una en una les cinc garrafes d'aigua sobre el sensor.

El primer pas en el calibratge és pesar el palet per tal de saber de quina càrrega es parteix, a part del pes de les garrafes d'aigua. A continuació es situa el sensor al centre de la bàscula i es fixa amb cinta adhesiva per tal d'evitar que es pugui moure. És necessari que

només faci contacte amb el palet la part sensora de les resistències variables. És per això que es va idear un gruix addicional (Figura 4.4.) format de diferents capes de cartró i material tèxtil del mateix diàmetre que la part sensora (9,7mm). Aquesta capa de gruix es va fixar al sensor amb cinta adhesiva de doble cara. La capa tèxtil té la funció d'homogeneïtzar la força sobre el sensor i evitar pics de força concentrats en un punt.

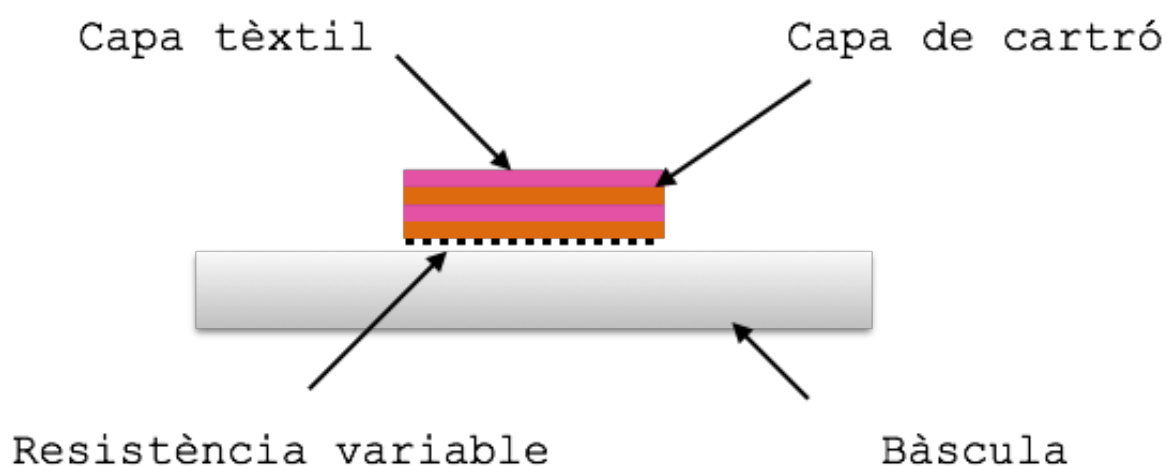


Figura 4.4. Gruix addicional situat a la part sensora de les resistències variables.

Un cop es té el palet situat a sobre del sensor, es van afegint garrafes d'una en una (Figura 4.5.). Mentre es realitza aquest procediment, un algorisme desenvolupat amb MATLAB va registrant les dades (es detalla el funcionament dels programes utilitzats per realitzar el calibratge del sensor a l'apartat 4.2.2.), així posteriorment es pot extreure la corba de calibratge. Aquest procediment es repeteix per cada un dels sensors.

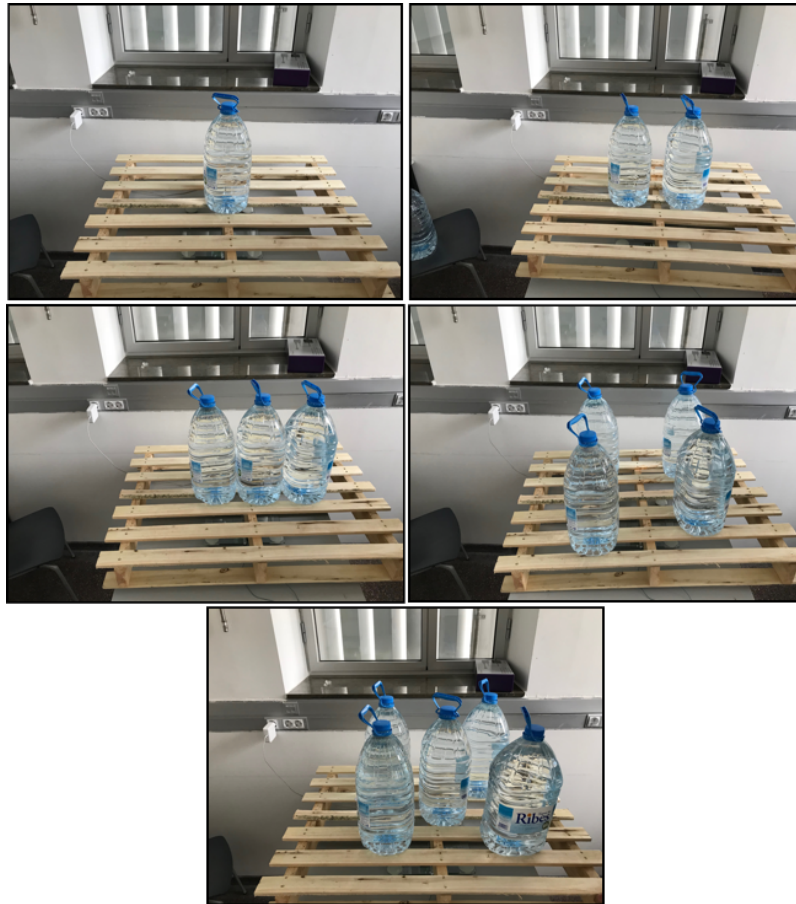


Figura 4.5. Procediment de col·locació de les garrafes per portar a terme el calibratge.

4.2.2. Programes MATLAB per realitzar el calibratge

Per realitzar el calibratge dels sensors s'utilitzen dos programes (codis) de MATLAB diferents. El primer s'utilitza per llegir el voltatge que està registrant el sensor, i el segon per extreure la corba de calibratge de cada un dels sensors.

El circuit electrònic que s'utilitza per realitzar el calibratge i l'adquisició de les dades és molt senzill, consta d'una resistència seguit d'una resistència variable (el propi sensor) i la placa Arduino, que es pot veure a la Figura 4.6.

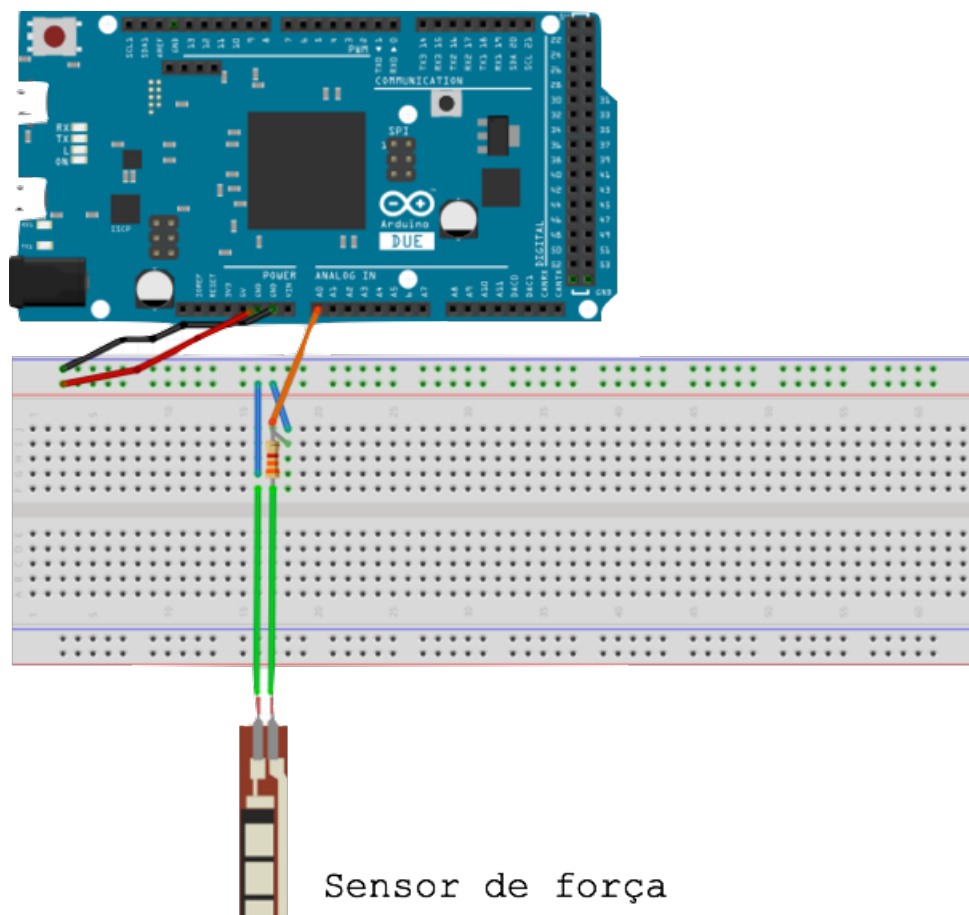


Figura 4.6. Circuit per llegir les dades d'un sensor durant el calibratge.

El primer programa s'anomena *Llegir_voltatge1canal.m*. Es tracta d'un programa molt senzill que llegeix el voltatge d'un sensor per sis pesos diferents (el primer dels quals és 0 kg) i ho enregistra en una variable. En una fitxer MATLAB es guarda la informació del temps i els valors del voltatge, amb el nom de: *calibracio_sensorX.mat*¹. S'observen les gràfiques del voltatge respecte el temps, a mesura que es va gravant (a temps real). Tal i com s'ha indicat es parteix del pes de 0 kg i es van afegint garrafes d'aigua de 8 l una a una. Sabent que cada una té una massa d'aproximadament 8 quilograms –es mesura el

¹ La X indica el número del sensor. Per cada sensor, s'utilitza la numeració pertinent en funció del sensor que es tracta. Per exemple, el sensor 1 està associat al canal analògic 1 de l'Arduino DUE.

pes total amb una bàscula a cada lectura-, es tindran les mesures d'aproximadament 0, 8, 16, 24, 32 i 40 kg (Taula 4.2.). A la Figura 4.7. es poden veure els sis graons de calibratge obtinguts en realitzar aquest procediment. Es repeteix 7 vegades, una per cada sensor.

Un cop es tenen totes les gràfiques temps/voltatge de cada sensor, s'utilitza un segon programa que calcula la corba de calibratge (força respecte voltatge) per cadascun d'aquests. Aquest s'anomena *Calibració1.m* i utilitza l'arxiu guardat al programa anterior per generar la corba de calibratge per un sensor. És un programa interactiu que primer pregunta quants punts interessa agafar de la gràfica, i s'assenyalen manualment els 6 punts que coincideixen amb el pes que s'estava exercint a sobre del sensor. La segona pregunta del programa és: quin valor de força es correspon a cada punt? Sabent la massa del palet (6,3 kg) i el nombre de garrafes que hi ha a sobre del palet, es poden calcular els pesos aplicants, mitjançant l'expressió següent:

$$P = 9,81 \times (6,3 + 8n); \quad (\text{Eq. 4.1})$$

essent n el nombre de garrafes. A la Taula 4.2. es mostren els pesos que s'han utilitzat per construir les corbes de cal·libració (a part del pes nul – voltatge nul).

n garrafes	Pes [N]
1	140,3
2	218,8
3	297,2
4	375,7
5	454,2

Taula 4.2. Valors del pes aplicat en Newtons en funció del nombre de garrafes d'aigua.

Un cop es tenen seleccionats els sis punts (un és el punt d'una força igual a 0 N), el programa calcula la corba de calibratge del sensor, que es forma a partir dels coeficients del polinomi que la representa i és de tipus quadràtic. Aquesta es guarda com

corba_calibracio_sensorAX.m i té la forma que es pot veure a la Figura 4.8. La corba de calibratge s'utilitza per traduir les dades llegides en volts a Newtons.

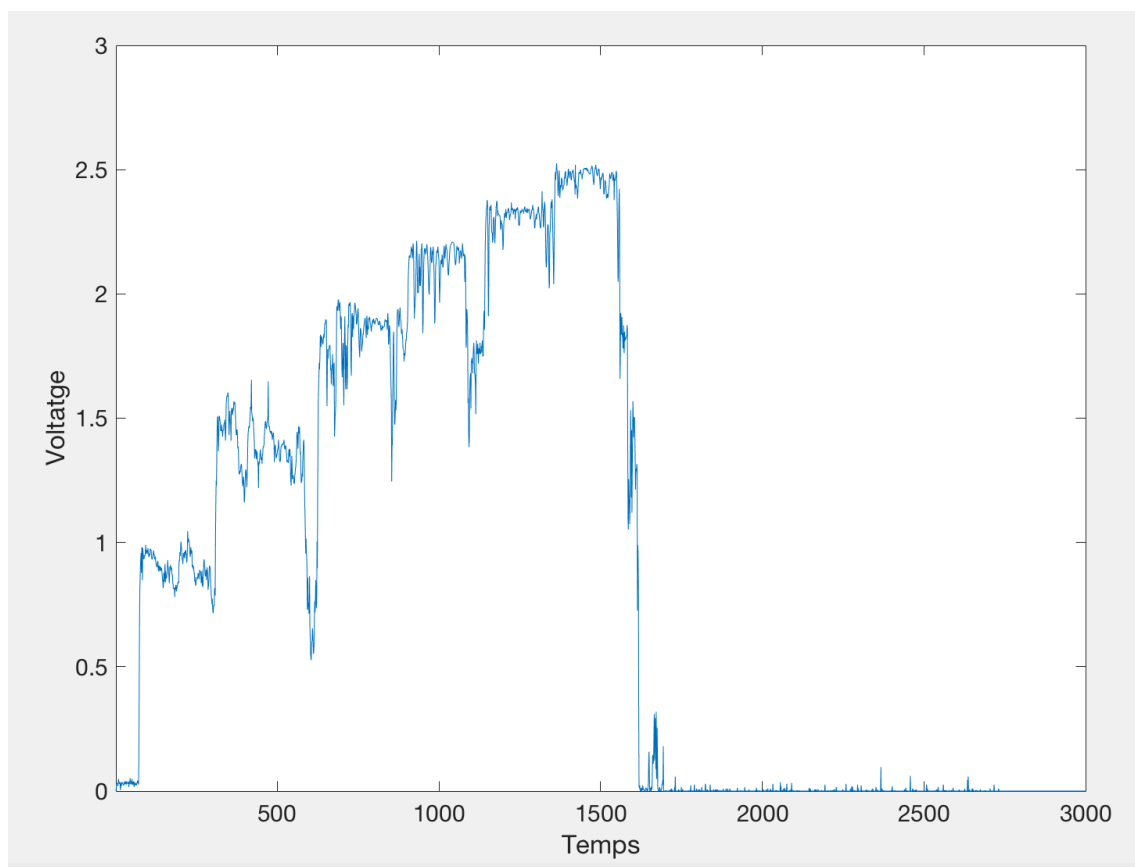


Figura 4.7. Gràfica amb sis graons de calibratge per al sensor 5.

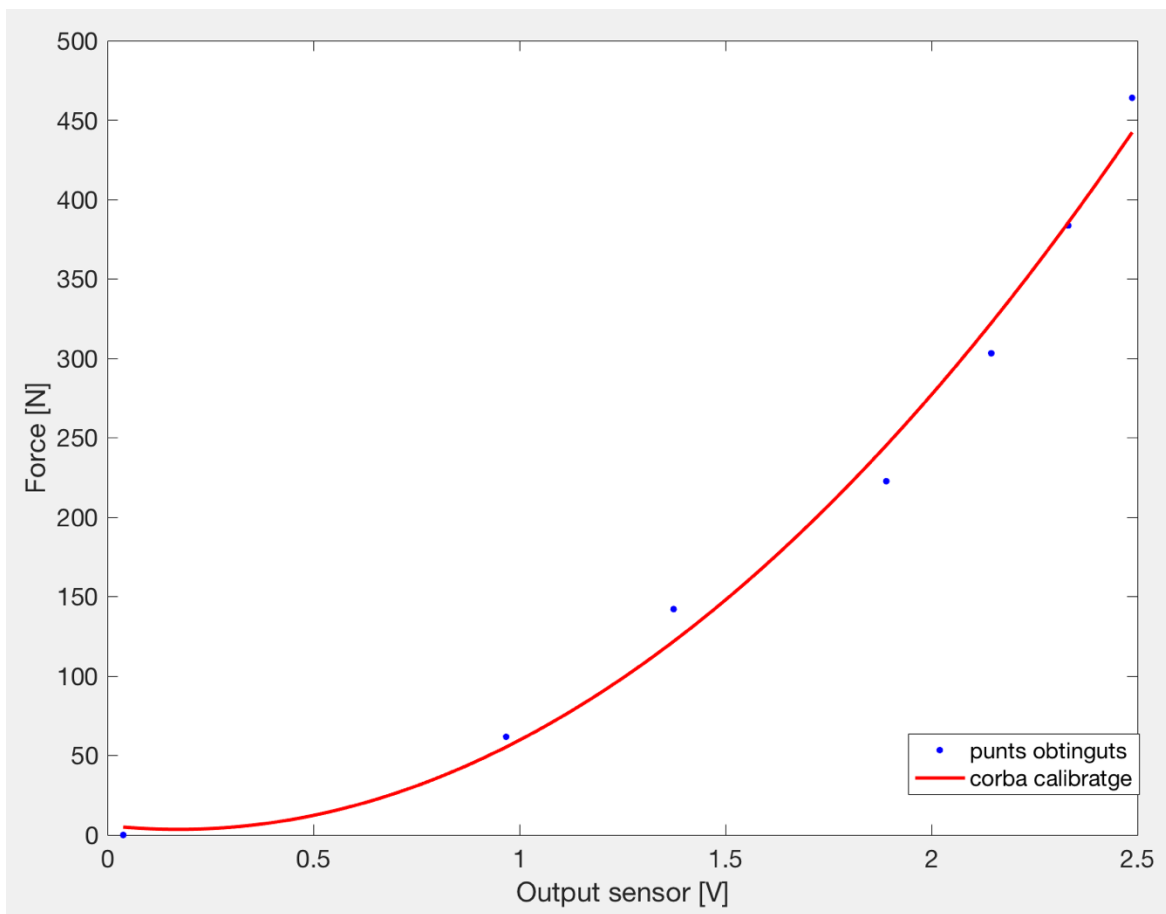


Figura 4.8. Corba de calibratge del sensor 5.

4.2.3. Comprovació

Es va comprovar si hi havia pèrdues o imperfeccions a la lectura del voltatge entre quan es connectaven els sensors mitjançant segments de cables enllaçats entre si, i quan es connectaven utilitzant un sol segment de cable. Es van enllaçar quatre cables de 31 cm a un sensor. Aquesta és la llargada de cable suficient per fer arribar el muntatge de tots el sensors a les seves respectives posicions a sobre de la bicicleta.

Es va posar el sensor connectat directament a la placa a sobre una bàscula amb el palet i quatre garrafes d'aigua a sobre i es va utilitzar el programa *Llegir_voltatge.m*. Llavors es va aplicar el mateix procediment però amb els 4 cables connectats al sensor. Tots dos processos es van repetir per cada un dels sensors.

A continuació es mostra la Figura 4.9. on es pot veure la comprovació per un sensor connectat directament a la placa i pel mateix sensor connectat amb l'extensió de cables a la placa.

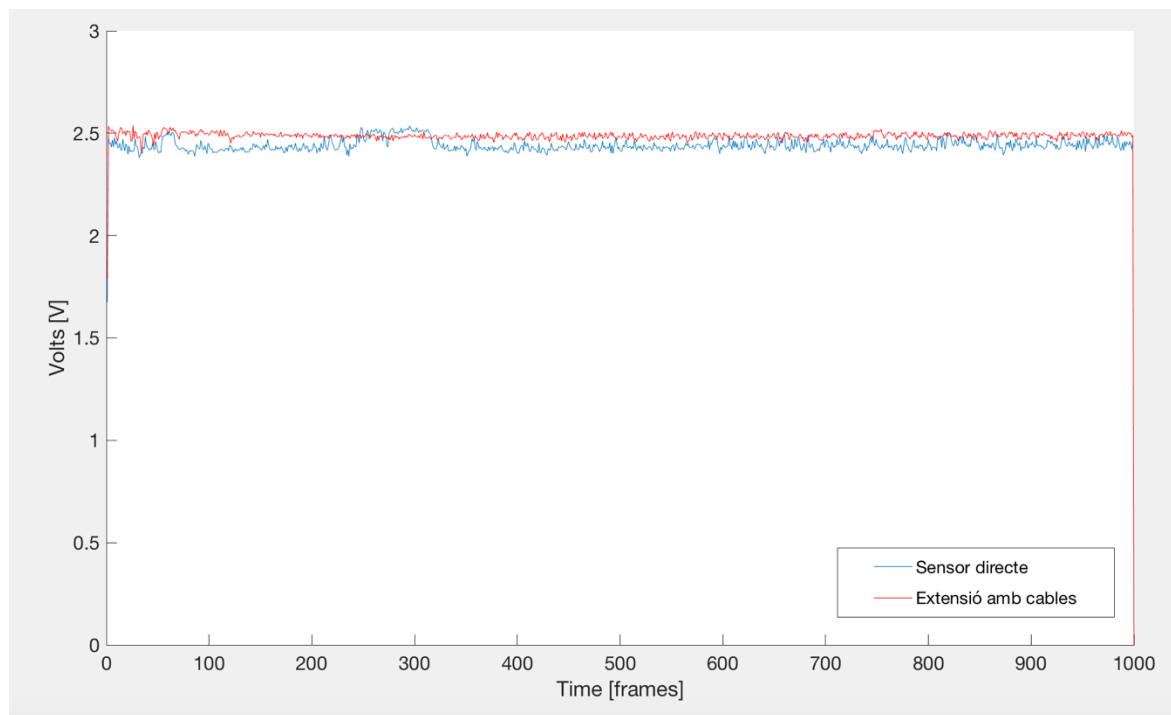


Figura 4.9. Comparació d'un sensor connectat directament a la placa i connectat amb l'extensió dels cables.

Si es comparen les dues gràfiques s'aprecia que els set sensors estan llegint pràcticament el mateix voltatge durant els 1000 *frames* que dura l'experiment. Per tant es pot concloure que si es realitza una extensió dels sensors amb quatre cables no afecta a la lectura del voltatge.

4.3. Muntatge del circuit d'electrònica

Aquest apartat explica el sistema que es va utilitzar a nivell electrònic per portar a terme la mesura de les forces de contacte així com el muntatge amb les *webcams* per adquirir les imatges que posteriorment permetran realitzar l'anàlisi cinemàtica de l'estudi.

4.3.1. Muntatge del sistema d'electrònica dels sensors

Per realitzar el muntatge del sistema d'electrònica dels sensors, primer es va realitzar una prova amb una sol sensor. En comprovar que aquest circuit funcionava es va procedir a fer el muntatge amb els set sensors que es necessiten per fer l'estudi.

El circuit consta, tal i com s'ha indicat a l'apartat 4.2.2, d'una resistència fixa (330 k Ω), una resistència variable (el sensor) i una placa Arduino DUE. Es forma un divisor de tensió, on el voltatge mesurat és la caiguda de tensió entre els borns del sensor (resistència variable).

Pel cas dels set sensors, tots comparteixen la mateixa placa Arduino, i cadascun es connecta a una resistència de 330k Ω diferent (Figura 4.10.). De la *proto-board*, surten les extensions fetes amb cables (2 cables per sensor) per arribar a totes les parts de la bicicleta on hi ha col·locats els sensors. Surten 7 cables en direcció a la placa Arduino que es connecten als pins analògics d'entrada. D'aquesta manera es llegeix el voltatge de la caiguda de tensió entre els borns dels 7 sensors. El terra (GND, 0 V) de l'Arduino i de la *proto-board*, també estan connectats. La placa Arduino està connectada mitjançant USB a un ordinador portàtil on s'enregistren totes les dades.

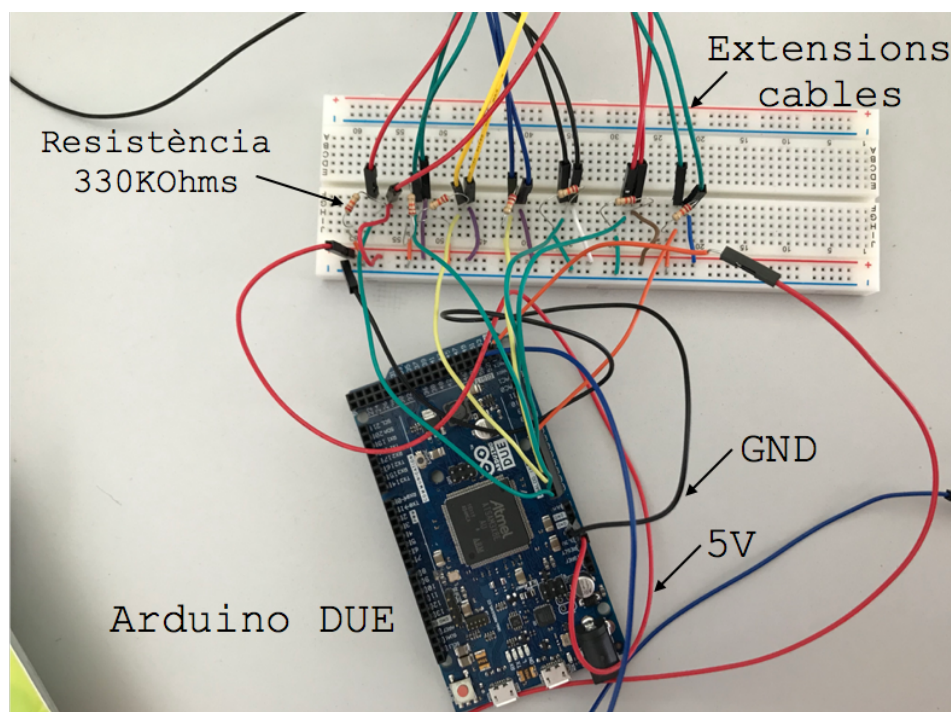


Figura 4.10. Circuit electrònic pels set sensors.

4.3.2. Muntatge del sistema de captura de vídeo

Per poder fer l'adquisició de les imatges de la pedalejada s'utilitzen dues *webcams*, cal recordar que es tracta d'un sistema *low-cost* i l'opció més econòmica per enregistrar el vídeo és mitjançant *webcams*.

Dues *webcams* es situen a cada banda del ciclista (Figura 4.11.), per tal de capturar el moviment tant de la cama dreta com de l'esquerra. Aquestes *webcams* es connecten a un portàtil auxiliar diferent a l'utilitzat per processar les dades de les forces de contacte. El codi MATLAB que s'utilitza per capturar les imatges guarda les dades de les imatges a cada instant de temps (*frame*) en format *Red, Green, Blue* (RGB), per tal de ser processades a posteriori. També es guarda la línia de temps, en segons, i s'envia un senyal digital a l'Arduino UNO, per indicar quan es comencen a capturar les dades d'imatge.



Figura 4.11. Webcam que registrava el moviment des del perfil esquerre (vist des de sobre la bicicleta).

4.4. Muntatge a la bicicleta

Una bicicleta convencional no es troba adaptada per integrar un sistema d'adquisició de dades com el del projecte. En aquest apartat s'explica quin seguit d'adaptacions i modificacions s'han realitzat a la bicicleta per poder portar a terme l'estudi.

4.4.1. Estructures per col·locar els sensors

La principal idea és que els sensors han de romandre entre dues superfícies planes per fer-ne una lectura de dades correcta. Per poder integrar els sensors al muntatge de l'adquisició de dades es van dissenyar dos tipus de suports diferents. Un suport pel seient i un altre pels pedals.

La bicicleta de carretera amb la que es va fer l'estudi, porta uns pedals tipus Shimano¹ (Figura 4.12.), que són uns pedals de competició, i un seient que no permet fer l'adaptació del sistema d'adquisició de dades.

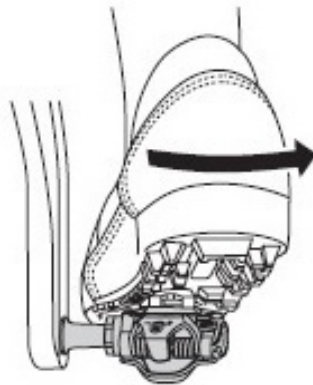


Figura 4.12. Pedals tipus Shimano.

¹ Sistema on el peu queda fixat al pedal mitjançant una cala que es munta a una sabatilla especial per fer ciclisme de carretera.

Per aquest motiu es van canviar els pedals per uns pedals de bicicleta de passeig. Es van dissenyar i fabricar quatre plaques rígides de fusta d'11 mm d'espessor i de dimensions 76 x 54 mm (Figura 4.13.), dues per cada pedal. A cada pedal, els sensors es situen entre les dues plaques. Per tant, una d'aquestes s'ha de fixar al pedal i l'altra placa s'ha d'unir a aquesta de manera no llisqui, per tal que faci de suport però no transmeti força perpendicular a la superfície de les plaques, ja que es vol que aquesta es transmeti tota a través dels sensors. Es fan dos forats de 9 mm diàmetre per on es col·loca un passador que fa d'enllaç entre ells (Figura 4.14.). El passador es munta en posició perpendicular a les plaques per evitar així que distorsioni la lectura de les forces perpendiculars, i només exerceixi forces axials, que es consideren negligibles en aquest estudi.



Figura 4.13. Superfície de fusta amb dos passadors.

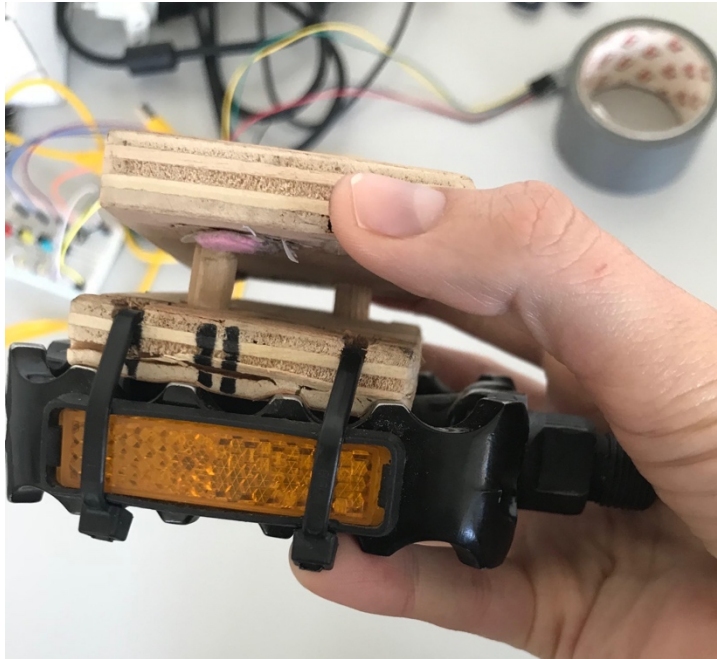


Figura 4.14. Passadors que uneixen les dues superfícies

Per poder fer el muntatge de les dues superfícies al pedal, aquestes es van lligar amb quatre brides al nou pedal, dues a cada extrem del llistó. Per tal de no crear un gruix amb les brides entre les dues superfícies, es va haver de fer una regata per cada brida i que, aquesta quedés integrada en la mateixa superfície de fusta (Figura 4.15.). La idea és que el sensor quedi entremig d'aquestes dues superfícies rígides a les quals se'ls hi afegeix un gruix com l'explicat a l'apartat 4.2.1, per tal que només faci contacte la part sensora de la resistència variable.

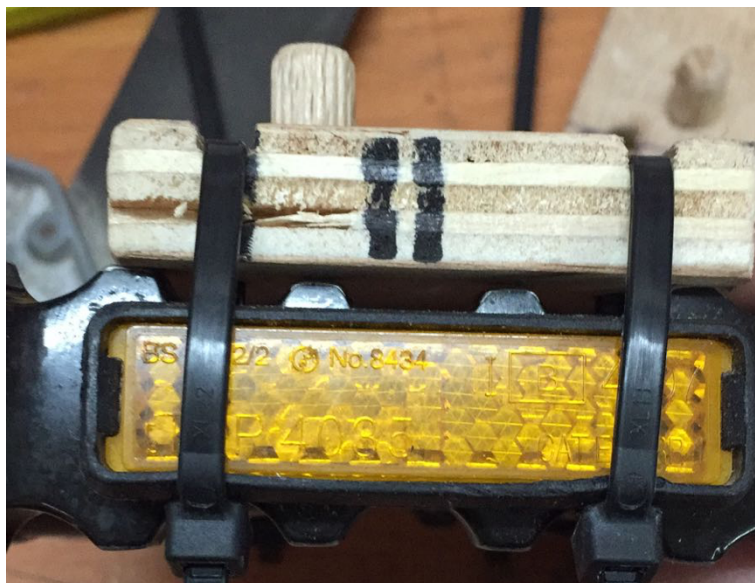


Figura 4.15. Dos dels quatre encasts que hi ha per tal que les brides no representin un gruix addicional.

En el cas de la integració del sistema al seient, es segueix el mateix procediment. En aquest cas, també es canvia el seient per un altre que facilita el muntatge dels suports. Aquests, en comptes de ser rectes, ressegueixen la silueta del seient com es pot veure a la Figura 4.16. Hi ha tres punts d'unió de forma vertical entre els dos llistons.



Figura 4.16. Suport per posar els sensors al seient.

4.4.2. Disposició i col·locació dels sensors

Per realitzar l'estudi de les forces de contacte s'utilitzen set sensors. Els sensors estan ubicats als punts on s'exerceixen les forces. Per mesurar les forces de contacte als pedals es col·loquen dos sensors als extrems de cada pedal (Figura 4.17.). Al seient es col·loquen tres sensors dos a l'extrem més ample i un a l'extrem estret (Figura 4.18.).

Cada sensor de força té un número marcat sobre ell mateix que va de l'1 al 7, i sobre els suports rígids es marquen els mateixos números. Cada número va associat a un sensor, d'aquesta manera, l'ordre de les corbes de calibratge sempre és el mateix.

Per cadascun dels sensors s'apliquen els gruixos addicionals mencionats anteriorment que consten de quatre capes, que intercalen una capa de teixit tèxtil i una capa de cartró, per procurar que només faci contacte la part sensora amb els suports. Aquests gruixos, s'uneixen a la part sensora mitjançant cinta adhesiva de doble cara. Per unir els sensors amb les superfícies rígides de fusta que es troben unides als pedals, s'utilitza cinta adhesiva.

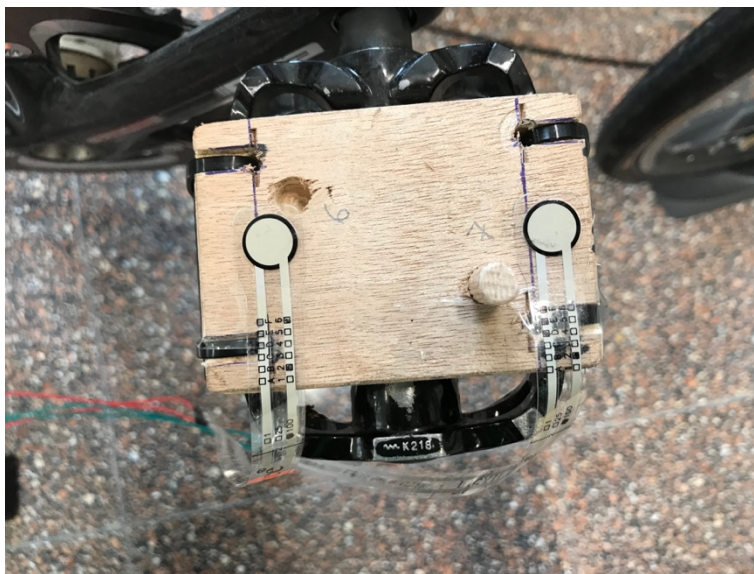


Figura 4.17. Disposició dels dos sensors d'un pedal.



Figura 4.18. Disposició dels tres sensors del seient.

4.4.3. Unió del muntatge de la bicicleta amb l'electrònica

Un cop es van tenir tots els sensors ubicats al seu lloc, es va procedir a connectar tot el muntatge. D'una banda es té la part de l'electrònica i per l'altra els sensors als seus respectius punts. Mitjançant les extensions fetes amb cables, es va unir tota la part de l'electrònica amb els sensors

Seguidament es van fixar els cables als extrems del rodet utilitzat amb cinta adhesiva, per evitar fregament amb les rodes de la bicicleta i que amb la pedalada s'emboliquessin, o que pel fregament es fessin malbé els cables. El següent pas va ser realitzar l'adquisició de les dades capturades pels set sensors de força (Figura 4.19.).



Figura 4.19. Unió del sistema d'electrònica amb la bicicleta.

4.5. Adquisició i processament de dades dels sensors de força

Aquest apartat està dedicat a explicar com s'han adquirit les dades dels set sensors que hi ha repartits per la bicicleta i com s'han processat, i també al processament de les dades i vídeos que s'han extret dels *triggers* de les *webcams*.

4.5.1. Adquisició de dades dels set sensors.

Un cop es té tot el muntatge preparat, que s'ha explicat en els anteriors apartats, la bici es posa sobre d'un rodets com s'observa a la Figura 4.20. El sistema permet treballar en moviment però de forma estàtica i amb la bicicleta que l'atleta utilitza habitualment pels seus entrenaments.

És important que els atletes puguin realitzar aquesta prova amb les seves pròpies bicicletes, ja que és amb aquestes amb les que s'entrenen i els interessa saber la potència desenvolupada amb la seva bicicleta concretament.



Figura 4.20. La bicicleta a sobre del rodet amb tot el sistema muntat i el ciclista preparat per realitzar l'experiment.

Es connecta l'Arduino DUE a l'ordinador i s'utilitza el mateix programa que s'ha utilitzat per fer el calibratge dels sensors (explicat a l'apartat 4.2.2.), aquest cop però, en comptes de llegir un sol canal, llegeix els set sensors a la vegada i s'anomena: *Llegir_voltatge.m*. Aquest programa enregistra el voltatge que es produeix al pedalejar durant 36 segons i crea un arxiu que es guarda sota el nom *trialX.mat* (seguint amb la X el codi que s'ha utilitzat durant tot el treball). L'Arduino UNO es connecta a l'altre ordinador (responsable de capturar la imatge) i aquesta envia un impuls per saber quan es connecten les *webcams* que enregistraran el moviment i així saber a partir de quin moment es pot començar a pedalejar.

Es van realitzar proves en diferents dies, les proves dels dos primers dies es van descartar ja que els resultats no van ser tan fiables com els de les proves de l'últim dia. El darrer dia es van realitzar 16 proves diferents per poder comparar resultats i descartar les proves

que no han sortit bé. Entre les 16 proves que es van realitzar, n'hi ha on l'atleta està agafat al manillar, aquestes s'utilitzen per comprovar les forces de contacte que s'exerceixen en el moment de la pedalada. En la resta, el ciclista pedala sense agafar-se al manillar, per treure una lectura vàlida per la dinàmica inversa, ja que en aquest treball no s'ha arribat a dissenyar un sistema per calcular la força que es fa amb les mans al recolzar-les sobre el manillar.

En aquest cas, el ciclista no porta sabates de ciclisme, sinó unes sabates sense el sistema de cales (Figura 4.21.), ja que per realitzar el treball de forma experimental, els pedals on era més assequible fer l'adaptació del sistema, eren els tipus de pedals que s'expliquen en l'apartat 4.4.1.



Figura 4.21. Sistema al pedal amb el ciclista a sobre.

4.5.2. Conversió de volts a Newtons

Tal i com s'ha mencionat anteriorment, els sensors de força tradueixen la força aplicada sobre ells a voltatge. Es va realitzar el calibratge de tots els sensors per poder saber l'equivalència entre els valors de voltatge i els de força.

Per realitzar aquest procediment, s'utilitza un programa que s'anomena *Conversio_volts_newtons.m*. Aquest programa utilitza les dades de voltatge del moviment

en qüestió i la corba de calibratge de cada un dels sensors on estan guardats els coeficients del polinomi (provinent del calibratge) per convertir el voltatge a Newtons.

En finalitzar el programa, guarda un fitxer amb el nom de *newtons_trialX.mat*. Amb aquest fitxer, ja es té el valor dels Newtons que s'apliquen en pedalejar, tant als pedals com al seient. Per tal de comprovar que els sensors estan llegint de forma correcta durant el pedaleig, es realitza una captura de forma estàtica (Figura 4.22.), amb el ciclista recolzat sobre el seient i els pedals, però sense pedalejar. El valor de la suma dels set sensors ha de donar un valor molt semblant al pes de la persona (72 kg).

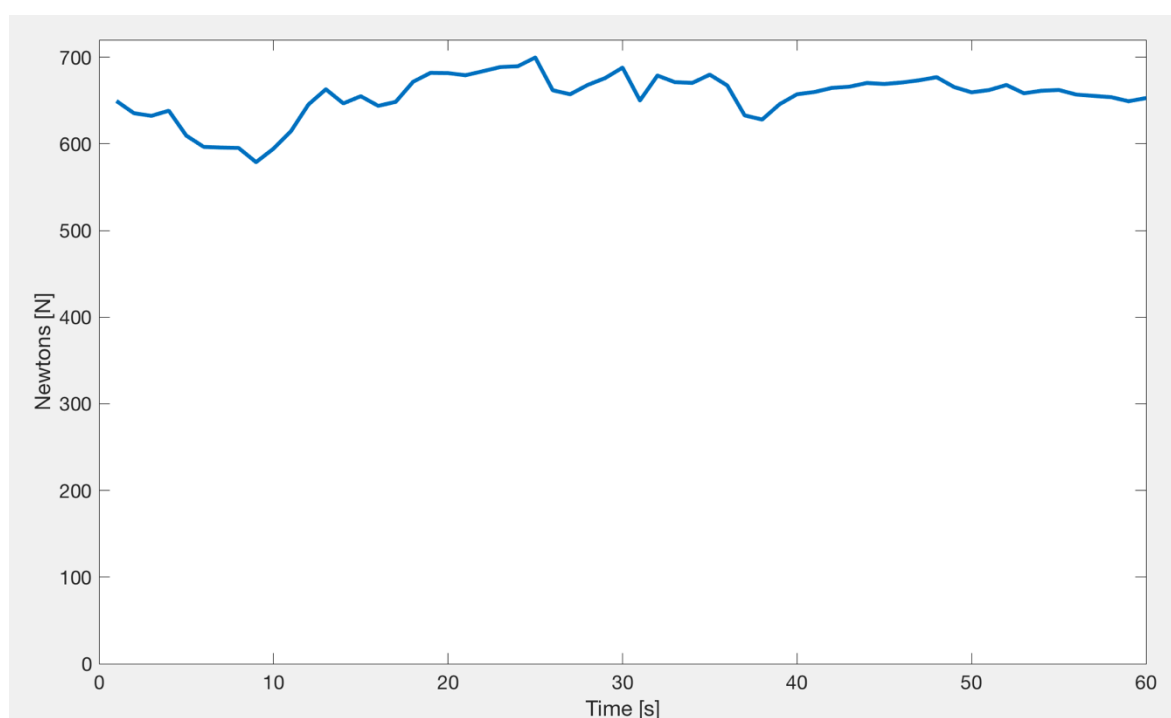


Figura 4.22. Gràfica dels set sensors sense moviment.

Es pot comprovar que la gràfica arriba fins un valor de 700 N (71,3 kg). Aquest valor s'aproxima molt al pes de l'atleta en qüestió, per tant, es pot afirmar que els sensors estan llegint correctament les forces en aquesta prova estàtica.

5. Adquisició de la cinemàtica

Aquest apartat està dedicat al procediment que s'ha seguit per aconseguir les dades de la cinemàtica que posteriorment s'utilitzen per realitzar la dinàmica inversa. S'introdueix el sistema de captura d'imatge i el processament de les imatges aconseguides en diferents proves.

5.1. Sistema de captura d'imatge

Per realitzar l'estudi de la cinemàtica i la dinàmica inversa, es va gravar el moviment del pedaleig des dels dos laterals de la bicicleta. Per portar-ho a terme, es van ubicar dues *webcams* als dos laterals del laboratori a l'alçada de la bicicleta procurant agafar el moviment més baix i més alt de la pedalada. Aquestes *webcams*, graven amb el sistema RGB (*red-green-blue*) (Figura 5.1.). Aquest sistema es basa amb la síntesi additiva dels colors, és a dir, utilitzant la lluminositat del vermell, verd i blau en diferents proporcions, es produeix tota la gamma de colors.

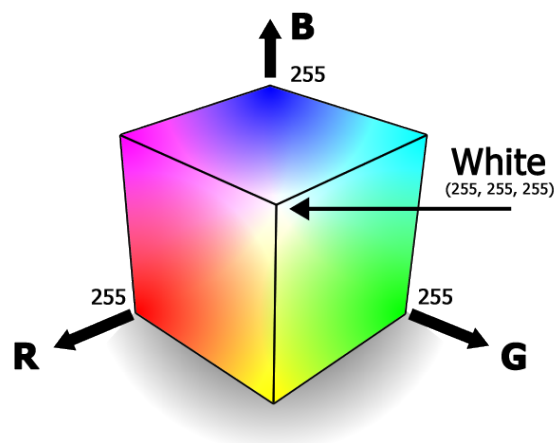


Figura 5.1. Sistema de colors RGB.

Amb el portàtil auxiliar, es va utilitzar l'*Image Processing Toolbox* de MATLAB per gravar els vídeos mentre el ciclista pedalejava. Aquest *toolbox*, guarda una matriu de quatre dimensions: les dues primeres indiquen el nombre de píxels, la tercera la composició dels tres colors (vermell, verd i blau) i la quarta correspon als *frames* del vídeo. Per totes les proves que es van realitzar, la matriu té 480 píxels horitzontals, 640 píxels verticals, la tercera conté tres elements, que són la composició de cada un dels colors i que varia per

cada *frame* i la quarta columna per cada prova varia lleugerament però sempre està al voltant de 220 *frames*.

Es van situar cinc marcadors (Figura 5.2.) per tal de conèixer l'orientació de la cuixa, la cama i el peu. Aquests repartits a les extremitats inferiors dreta i esquerra de la manera següent:

- Maluc.
- Articulació del genoll.
- Turmell.
- Cinquè metatars.
- Taló.

Tal i com s'ha mencionat anteriorment, per realitzar l'estudi de la dinàmica inversa, el ciclista no estava agafat amb les mans al manillar perquè això comportava incloure dos sensors més al manillar i complicava més l'estudi. És per aquest fet que en aquest treball, la part de les extremitats superiors (tronc, cap i braços) s'ha considerat com si estigués en posició estàtica i vertical, per així simplificar el model.



Figura 5.2. Ciclista a sobre la bicicleta amb els cinc marcadors enganxats a les articulacions.

5.2. Processament d'imatge

Un cop es van tenir tots els arxius amb les matrius que contenen la informació dels vídeos, es va realitzar el processament de la imatge. Per realitzar aquest procediment, es va convertir el sistema RGB a HSV.

L'HSV (*Hue, Saturation, Value*) és una transformació no lineal del model RGB en coordenades cilíndriques, així doncs cada color ve definit per tres dimensions: la tonalitat, la saturació i la brillantor (Figura 5.3.).

- La tonalitat és un angle definit entre 0 i 360 graus.
- La saturació és el nivell de saturació definit entre 0 (color blanc) i 1 que seria la tonalitat amb tota la seva intensitat. Es pot definir també amb percentatges.
- La brillantor està definida entre 0 (negre) i 1 (blanc). Com amb la saturació, es pot donar en forma de percentatge.

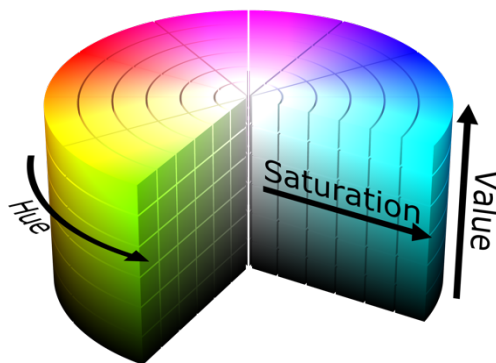


Figura 5.3. Ciclista a sobre la bicicleta amb els cinc marcadors enganxats a les articulacions.

Seguidament, es van identificar els punts on es troben els punts de color verd amb el codi MATLAB *ReadVideoData_TrackPoints_Logitech.m*. Aquest programa estableix els llindars de tonalitat, saturació i brillantor que hi ha definits pel color verd, per tal que localitzi els píxels que tenen aquesta combinació de paràmetres i la resta els negligeixi. Amb l'objectiu que s'agrupin els punts de color verd en àrees més grans, es defineix que la regió mínima per considerar que hi ha un marcador ha de ser d'un valor d'almenys 14 píxels. Un cop ha finalitzat el programa, es tenen tots els punts que es troben dintre dels llindars prèviament seleccionats.

Va sorgir un problema i és que aquest programa localitzava, tal i com s'ha indicat, tots els punts que aquest considerava de color verd (inclosos els que no eren els adhesius que s'havien col·locat). Per solucionar el problema, es va crear un programa que rep el nom de: *ProcessKinematics_Logitech.m*. En aquest, es realitza un seguiment (*tracking*) de punts manualment, per assegurar-nos que per cada *frame* processat només hi ha cinc punts que el programa considera de color verd, que són els cinc marcadors que hi ha sobre el ciclista. Aquest és un programa interactiu que demana quants *frames* es volen processar. No és necessari que es processin tots els *frames*, ja que n'hi ha alguns on el primer programa ja els va detectar correctament.

Un cop es van tenir totes les proves que interessaven processades, s'havien de convertir tots aquests punts processats a angles, mitjançant relacions trigonomètriques. Aquest procés es va realitzar també, mitjançant un codi de MATLAB que s'anomena: *MarkersToAngles_mot.m*. Aquest codi carrega tots els arxius necessaris per poder realitzar la conversió i crea dos arxius, un per la cinemàtica i un altre per les forces de contacte (en format *.mot*, llegible per l'OpenSim). Aquests dos arxius són els que permeten fer l'estudi de la dinàmica inversa posteriorment.

6. Dinàmica inversa

La dinàmica inversa és un mètode per calcular forces i moments basats en la cinemàtica d'un cos i de les propietats d'inèrcia d'un cos. En termes de biomecànica, és el procés que determina les forces que fan possible un determinat moviment, en el nostre cas, el pedaleig. S'utilitza per determinar els parells articulars.

L'equació general del moviment és la següent:

$$[M(q)] \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (\text{Eq. 6.1})$$

On $[M(q)]$ és la matriu d'inèrcia, $C(q, \dot{q})$ és el vector de termes d'inèrcia no lineals que depenen de la posició i la velocitat, $G(q)$ és el vector que prové de l'energia potencial associada al camp gravitatori i τ són els moments articulars.

El moviment del model està definit per les posicions, velocitats i acceleracions. Es coneixen tots els termes del costat esquerre de les equacions del moviment. El que no es coneix, són els termes de la dreta, els moments articulars resultants. La dinàmica inversa utilitza el moviment conegut del model per resoldre les equacions del moviment de les forces generalitzades desconegudes.

L'estudi de la dinàmica inversa s'ha realitzat mitjançant el programari lliure OpenSim. Per fer l'estudi, disposem de les dades cinemàtiques, les forces externes (forces de contacte als pedals i al seient) i els paràmetres antropomètrics.

Les forces de contacte i les dades cinemàtiques són les dades que s'han mesurat i que mitjançant el programa *MarkersToAngles_mot.m*, s'han obtingut dos arxius compatibles amb l'OpenSim. D'altra banda, pels paràmetres antropomètrics, s'utilitza un model genèric. Aquest model genèric conté els graus de llibertat de les articulacions, sis en aquest cas, tres per la part esquerra i tres per la part dreta, repartits de la següent forma:

- Articulació del maluc.
- Articulació del genoll.
- Articulació del turmell.

Coneixent la longitud des de l'articulació del genoll a l'articulació del turmell del subjecte en qüestió, s'ha escalat el model en l'OpenSim per a la persona en concret.

L'OpenSim, utilitza un software anomenat *Simbody* que permet calcular les forces i els moments resultants que es generen a les articulacions, en aquest cas durant el pedaleig, ja que internament té la informació de les equacions del moviment.

7. Resultats

En aquest apartat es detallen els resultats dels experiments realitzats durant aquest treball de fi de grau.

7.1. Calibratge

Es va realitzar el calibratge de cada un dels sensors seguint el procediment explicat a l'apartat 4.2.1. Les corbes de calibratge que es van obtenir són les que es poden veure a la Figura 7.1.

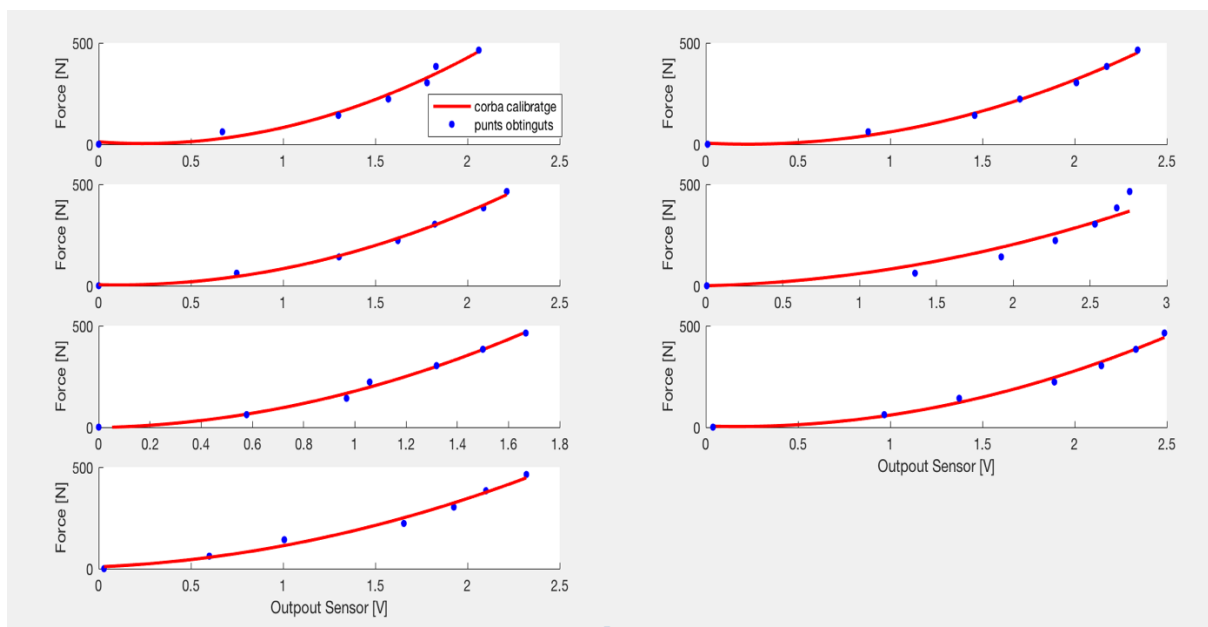


Figura 7.1. Corbes de calibratge de tots els sensors.

A la Figura 7.2. es pot apreciar amb més detall la variació entre les corbes de calibratge. Es pot veure la corba de calibratge pel sensor 1 i pel sensor 3. Es pot observar que cada corba de calibratge té uns valors diferents, és per això que es van calibrar els set sensors de força. No es podia assumir que el calibratge d'un sensor fos vàlid per als sis sensors de força restants.

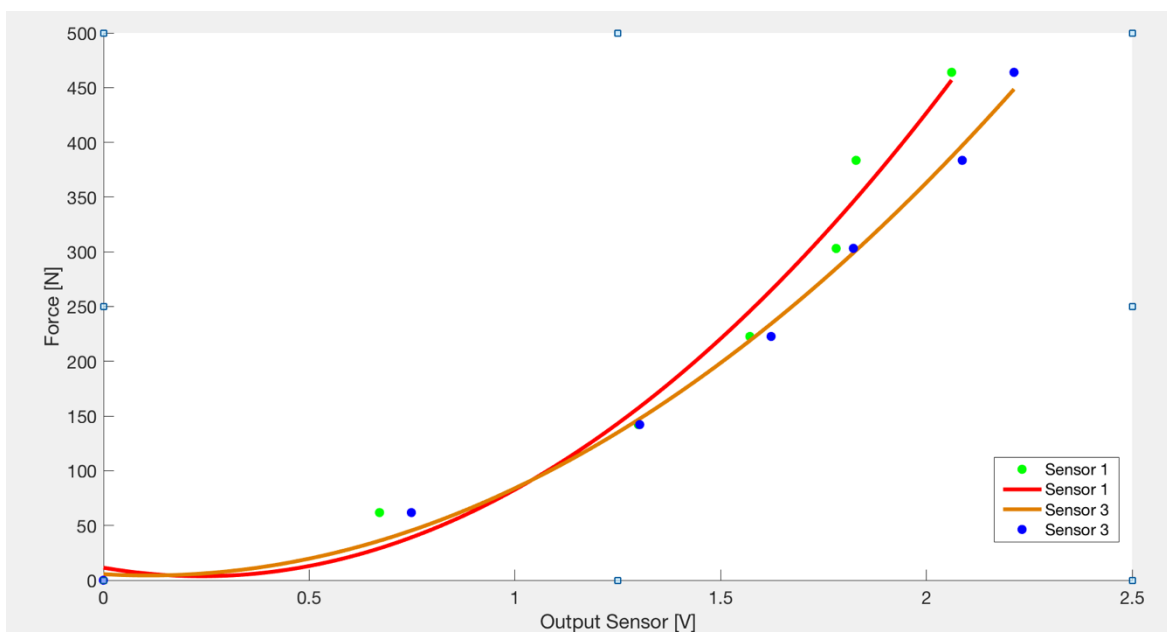


Figura 7.2. Corbes de calibratge del sensor 1 i 3.

7.2. Forces de contacte

Per mesurar les forces de contacte es van fer diferents proves amb tot el muntatge i amb el ciclista pedalejant a sobre del rodet a diferents velocitats: a velocitat baixa, velocitat alta i de forma progressiva, però sempre amb la mateixa càrrega de treball. Els resultats es poden veure a continuació. En aquest apartat es podrà veure si varien les forces de contacte en funció de la velocitat i els diferents tipus de gràfica que surten d'aplicar diferents velocitats.

La posició dels sensors des de sobre la bicicleta, és la següent (Figura 7.3.):

- **Sensor 1:** Part davantera del seient.
- **Sensor 2:** Part posterior dreta del seient.
- **Sensor 3:** Part posterior esquerra del seient.
- **Sensor 4:** Part davantera del pedal esquerre.
- **Sensor 5:** Part posterior del pedal esquerre.
- **Sensor 6:** Part davantera del pedal dret.
- **Sensor 7:** Part posterior del pedal dret.

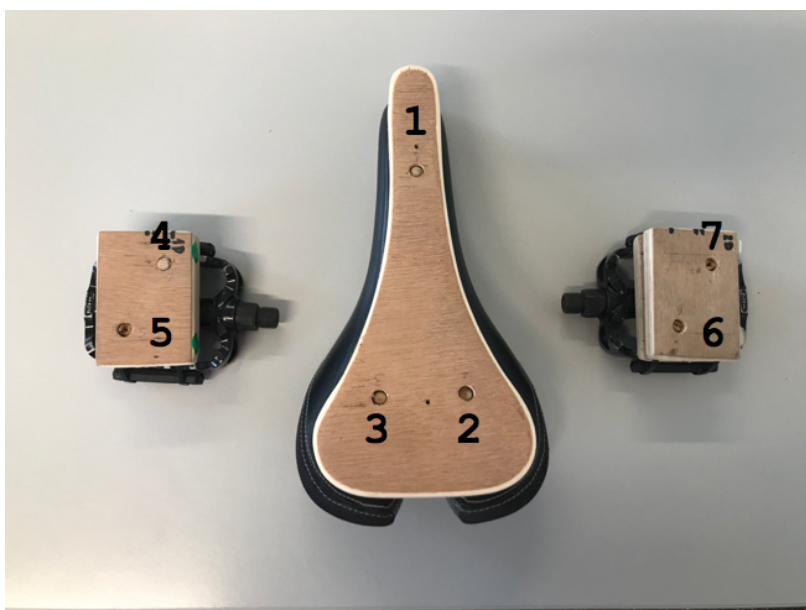


Figura 7.3. Ubicació dels sensors.

A la Figura 7.4. es poden veure les forces de contacte per una prova a una velocitat moderada (*self-selected speed*) i constant. En aquesta figura es poden apreciar els cicles del pedaleig que es produeixen als sensors ubicats als pedals (sensores 4, 5, 6, i 7). Al mateix temps, es pot veure que al sensor 4 la lectura de les forces és molt més baixa que a la resta de sensors ubicats als pedals. Aquest fet és a causa que el ciclista no recolzava el peu al mig del suport dels pedals sinó que va ubicar el peu a la part de darrera del pedal. Com a conseqüència les lectures dels sensors 5 són lleugerament més elevades que les dels sensors 6 i 7, on el peu estava correctament recolzat. La força més elevada s'aplica amb el sensor 5, això es deu al fet que va ser la cama amb la qual es va començar el moviment i la càrrega de treball triada per realitzar l'experiment era força elevada. Posteriorment es pot veure que un cop s'ha iniciat el moviment, és més fàcil mantenir-lo i la força va disminuint.

Es poden apreciar també les oscil·lacions que es produeixen en el moviment durant el pedaleig als sensors ubicats al seient. En el moment que la cama esquerra exerceix força per portar a terme el moviment, la gràfica del sensor 3 (sensor al seient) mostra un pic de força, degut al fet que s'està recolzant el pes a la part esquerra de cos. Aquest fet es pot observar a la Figura 7.5.

Contràriament, quan s'aplica força a la cama esquerra per realitzar el moviment, a la part dreta del seient (sensor 2), disminueix de forma considerable la força aplicada (Figura 7.6.).

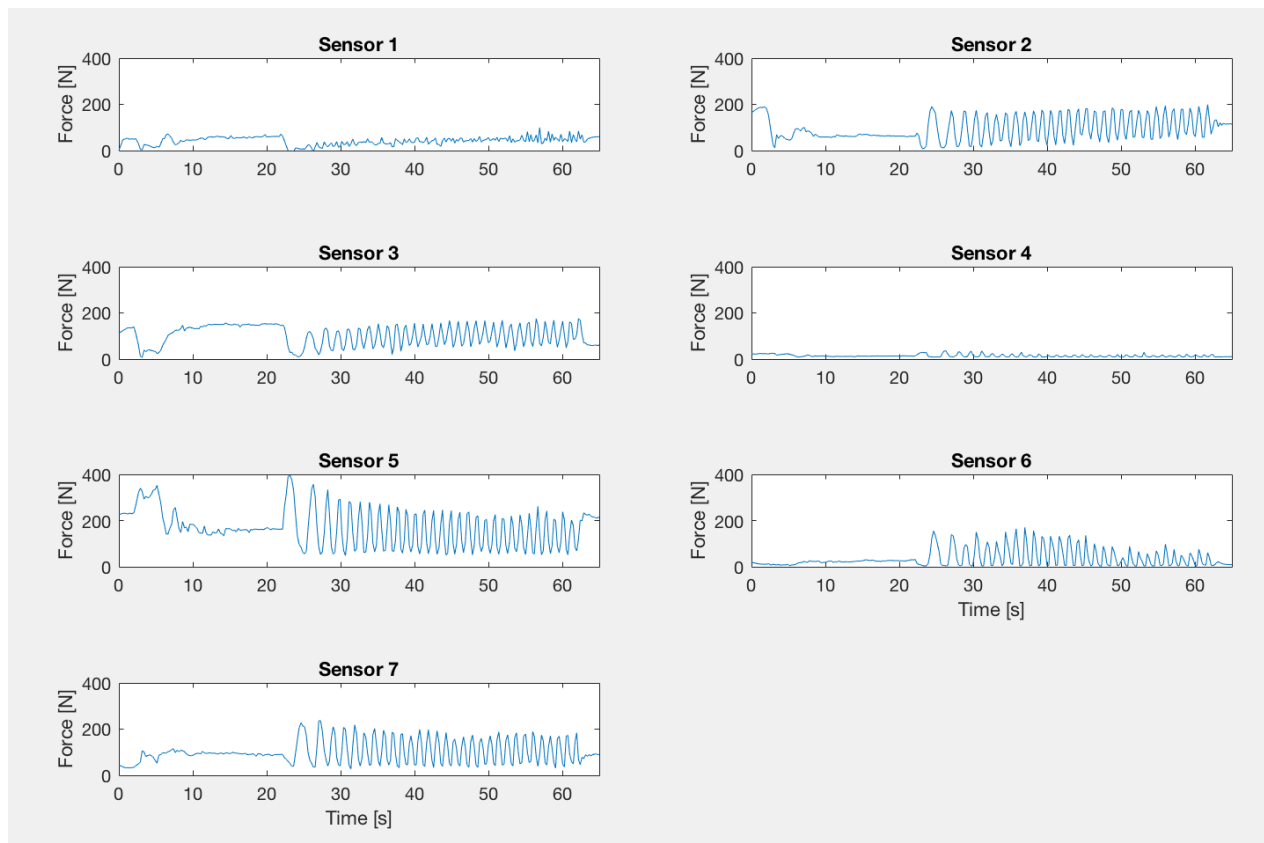


Figura 7.4. Forces de contacte a la prova 3.

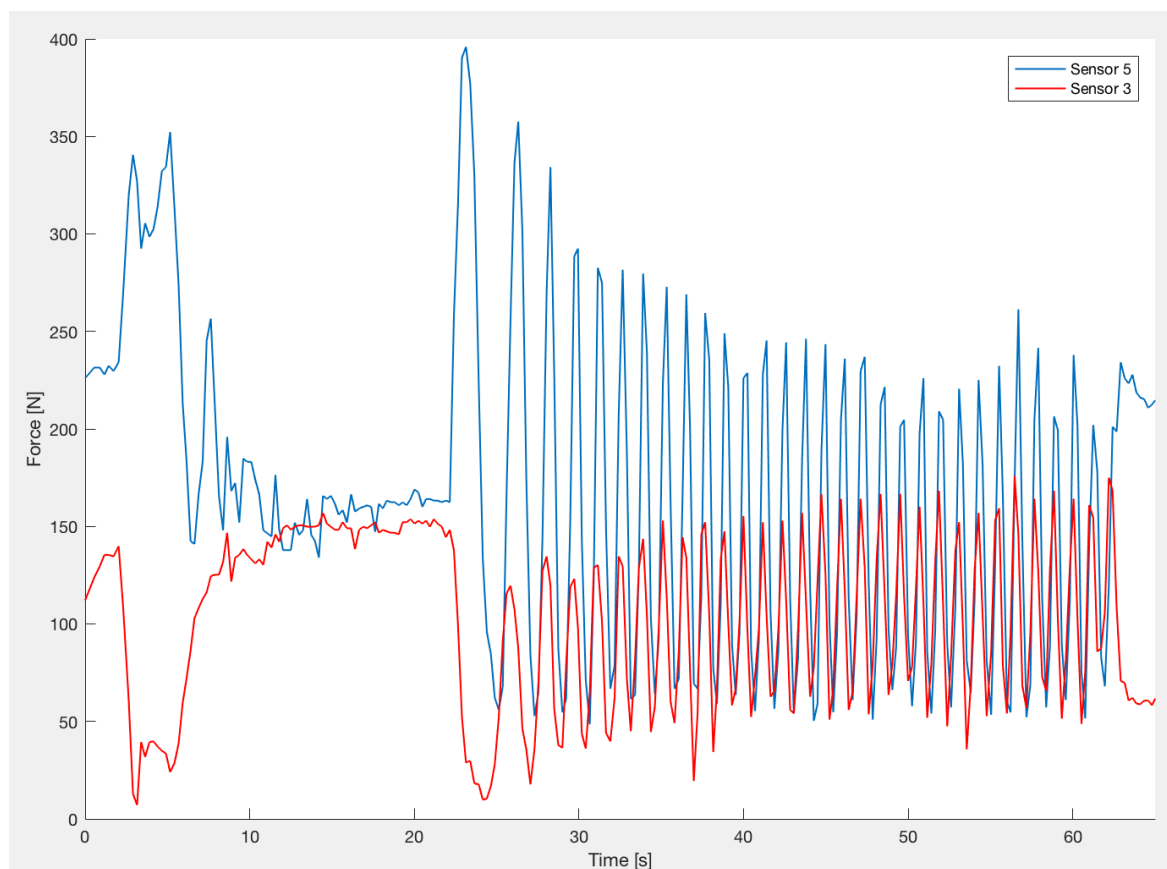


Figura 7.5. Comparativa del sensor 3 (part posterior esquerra del seient) i el sensor 5 (part posterior del pedal esquerre).

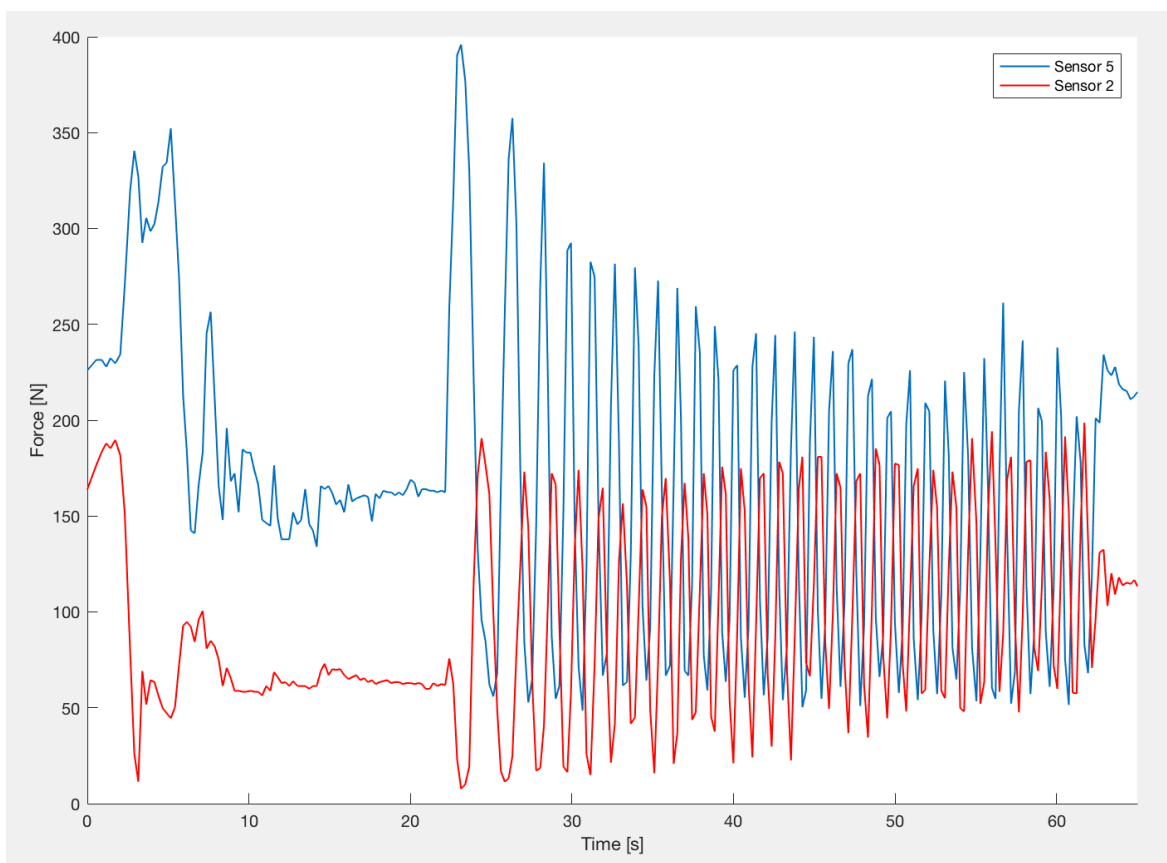


Figura 7.6. Comparativa del sensor 2 (part posterior dreta del seient) i el sensor 5 (part posterior pedal esquerre).

A la Figura 7.7. es pot apreciar com canvia la freqüència d'oscil·lació del pedaleig en funció de la velocitat aplicada. La càrrega de treball és la mateixa per les dues velocitats. Es pot veure que per fer una cadència més ràpida de pedaleig, la força que s'aplica als primers instants del moviment és una mica més elevada que per arrencar el pedaleig de forma lenta però que quan s'estabilitza el pedaleig, es manté la mateixa força per totes dues velocitats. Es pot veure també que, aproximadament per una pedalada lenta, se'n realitzen dues de ràpides.

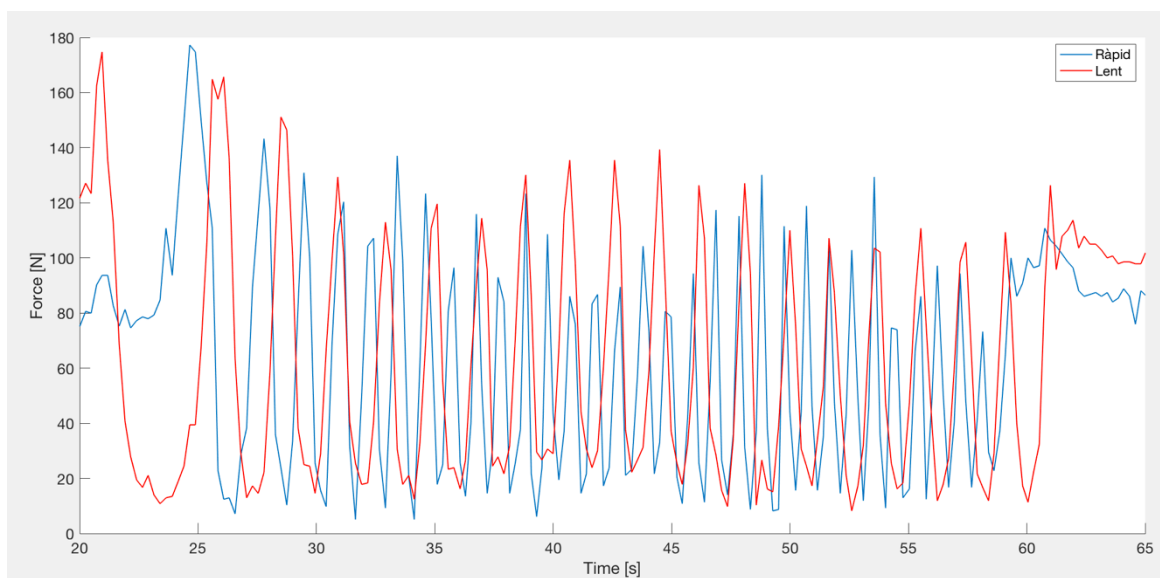


Figura 7.7. Comparativa del sensor 5 durant una cadència ràpida i una cadència lenta.

A la Figura 7.8., es detalla la gràfica per una cadència de pedaleig progressiva, de lenta a ràpida. S'aprecia com el moviment comença oscil·lant d'una forma més lenta, per acabar amb unes oscil·lacions més ràpides. Tot i això és una forma de la gràfica que es repeteix durant els diferents assajos pels altres tipus de moviments, ja que com que la càrrega de treball era elevada, no es podia començar el moviment amb una cadència elevada, sinó que s'anava de menys velocitat a més amb el pas del temps, fins a assolir l'objectiu de cadència.

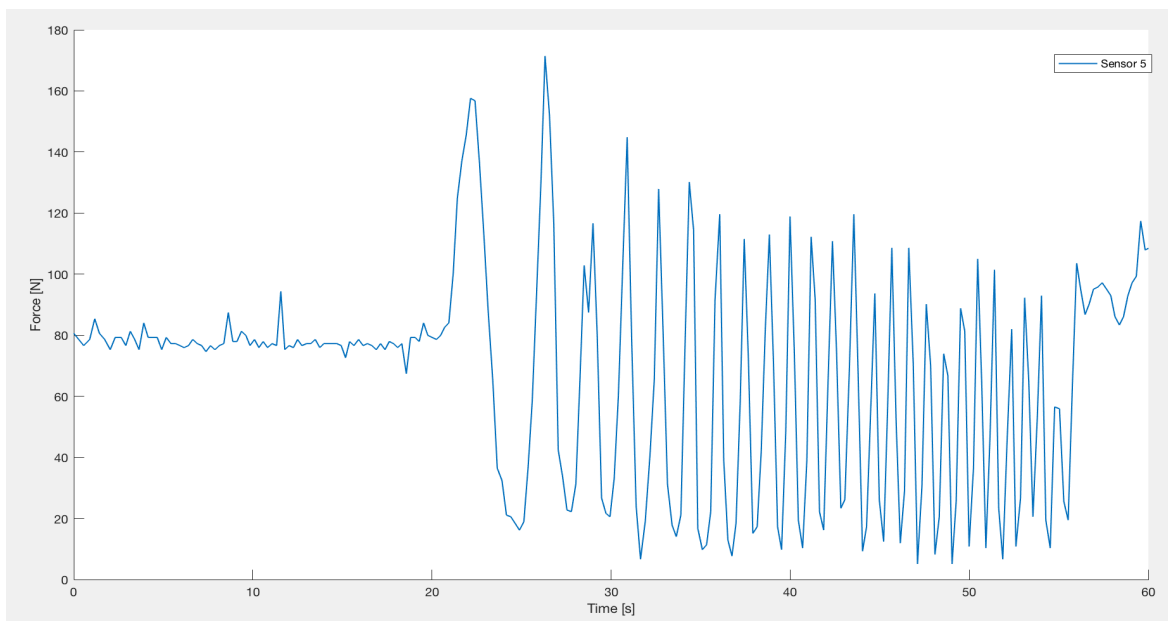


Figura 7.8. Sensor 5 per una cadència progressiva.

7.3. Angles articulars

En aquest subapartat es poden veure els angles que resulten en realitzar el moviment del pedaleig per a diferents proves. Amb les mateixes proves realitzades per extreure'n les forces de contacte, es poden treure els moments articulars. A l'annex A, es troben breus descripcions dels vídeos que es van gravar durant la realització de les proves.

Els angles articulars que es produeixen en una cadència de pedaleig constant són els que es veuen a la Figura 7.9.

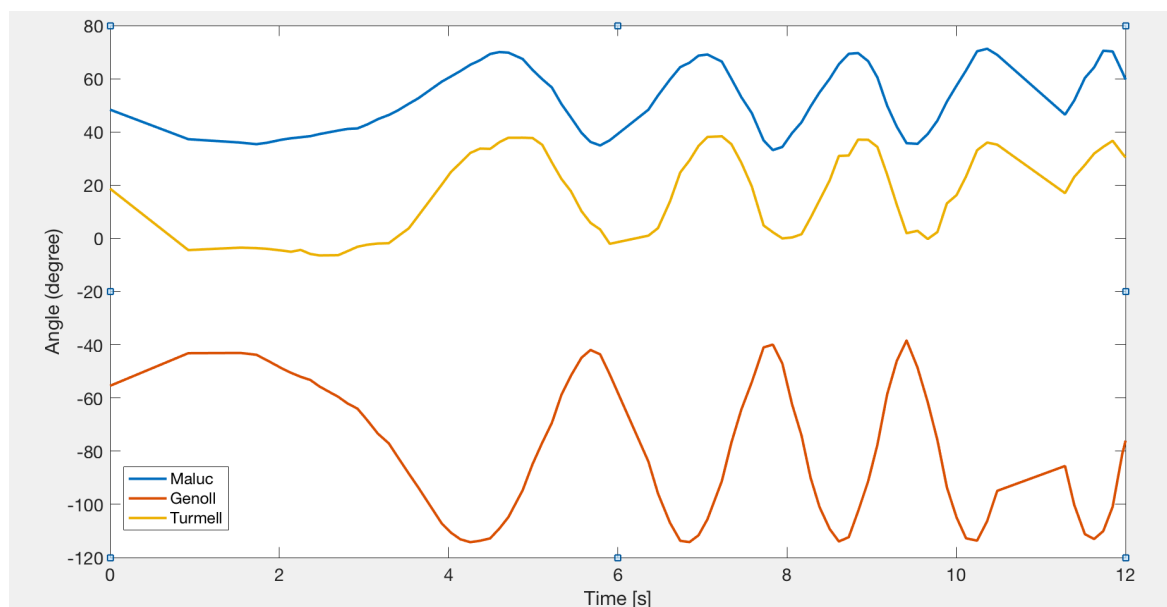


Figura 7.9. Moments articulars per una cadència constant.

A la Figura 7.10., es pot veure que els angles articulars que es produeixen en diferents proves, són pràcticament del mateix valor. En el cas d'aquesta figura, totes dues proves es van realitzar amb la mateixa cadència de pedaleig, és per això que els cicles de pedaleig tenen una durada molt aproximada.

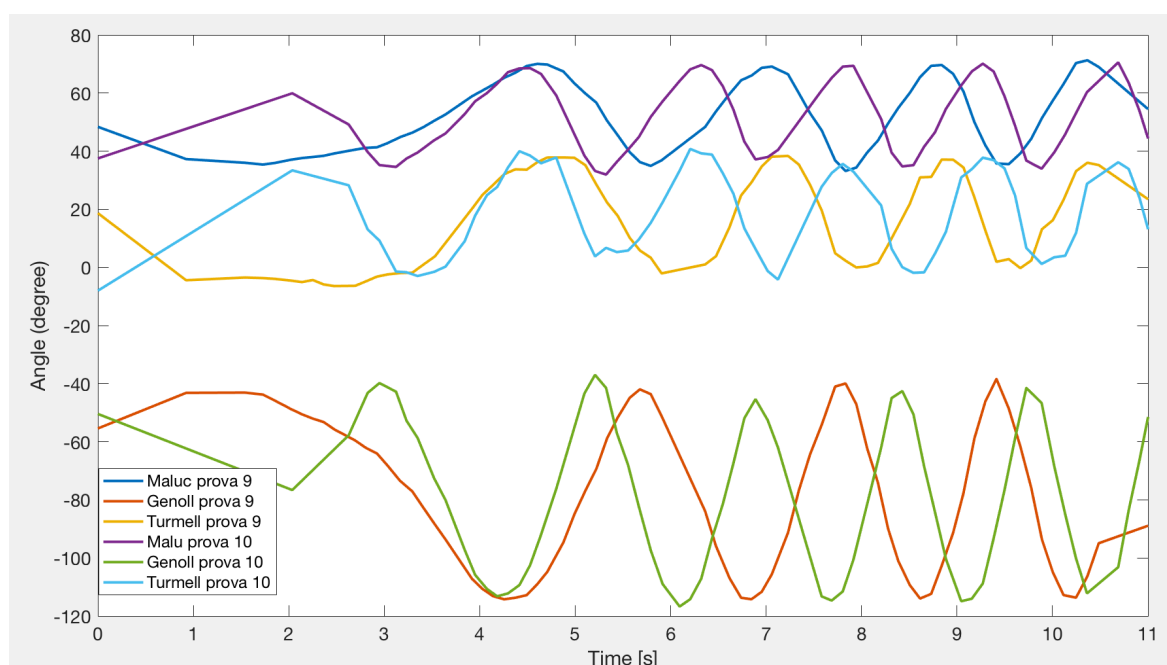


Figura 7.10. Moments articulars per dos moviments de pedaleig a unes velocitats similars.

Pel que fa als resultat dels angles articulars, es pot dir que no varien en funció de la cadència de pedaleig aplicada. Els angles que es produeixen són pràcticament sempre els mateixos. Això té tot el sentit, ja que si no es modifica la posició a la bicicleta, els angles articulars no variaran.

7.4. Dinàmica inversa

En aquest subapartat es poden veure els valors dels moments articulars al maluc, al genoll i al turmell per a diferents velocitats de pedaleig. S'utilitzen proves realitzades amb la mateixa càrrega de treball.

A la Figura 7.11., es pot veure el valor dels moments articulars per a la part dreta del cos al maluc, al genoll i al turmell a una velocitat constant de pedaleig. Es pot apreciar que els moments articulars més grans es produeixen al maluc. Al genoll i al turmell es produeixen uns moments molt similars.

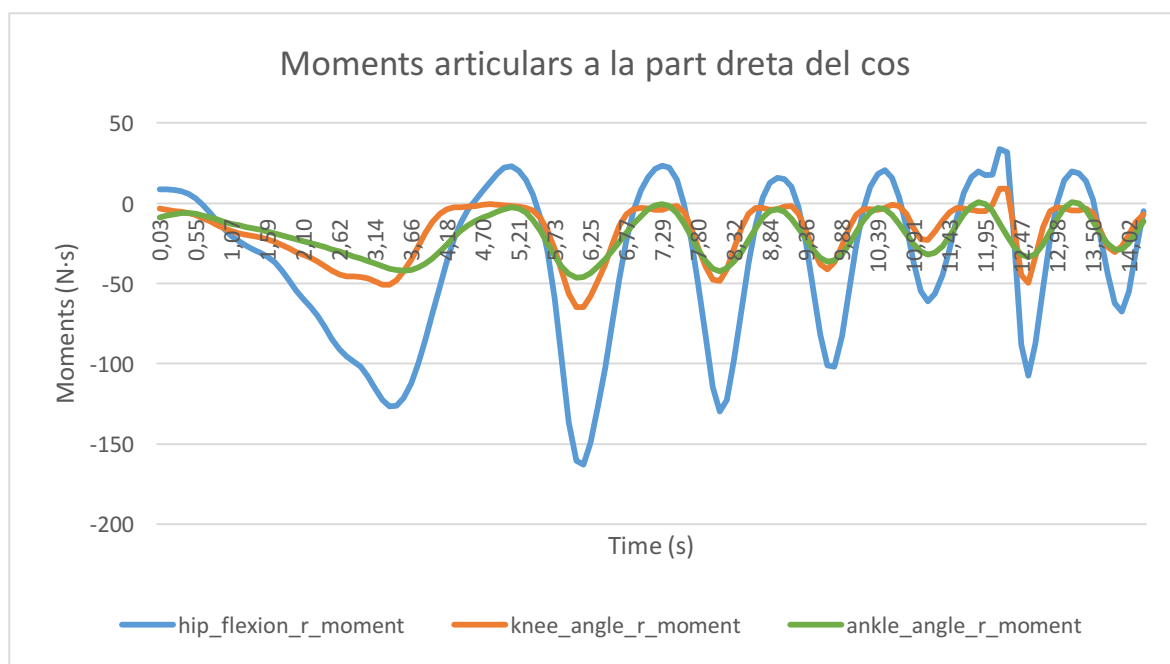


Figura 7.11. Moments articulars per una velocitat constat.

A la Figura 7.12., es poden veure els moments articulars al genoll esquerre i al genoll dret. S'aprecia com s'alteren els valors màxims dels moments articulars al genoll durant el

pedaleig. Quan s'aplica una força més alta amb la cama esquerra, es produeix el moment més gran al genoll esquerre i a l'inrevés.

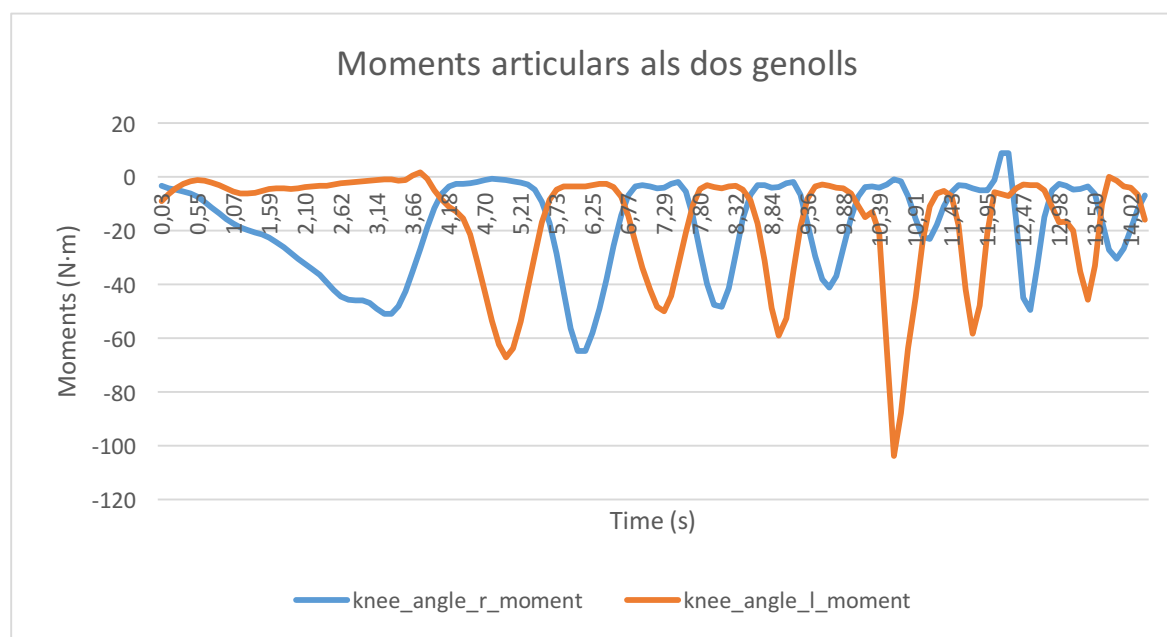


Figura 7.12. Moments articulars per als dos genolls a una velocitat constant.

Per una velocitat de pedaleig baixa, els moments articulars es veuen més espaiats entre ells (Figura 7.13.). S'aprecia la lentitud de la cadència de pedaleig. Es pot apreciar que durant la prova, es van perdre durant uns instants les lectures correctes dels sensors i que seguidament es tornen a recuperar.

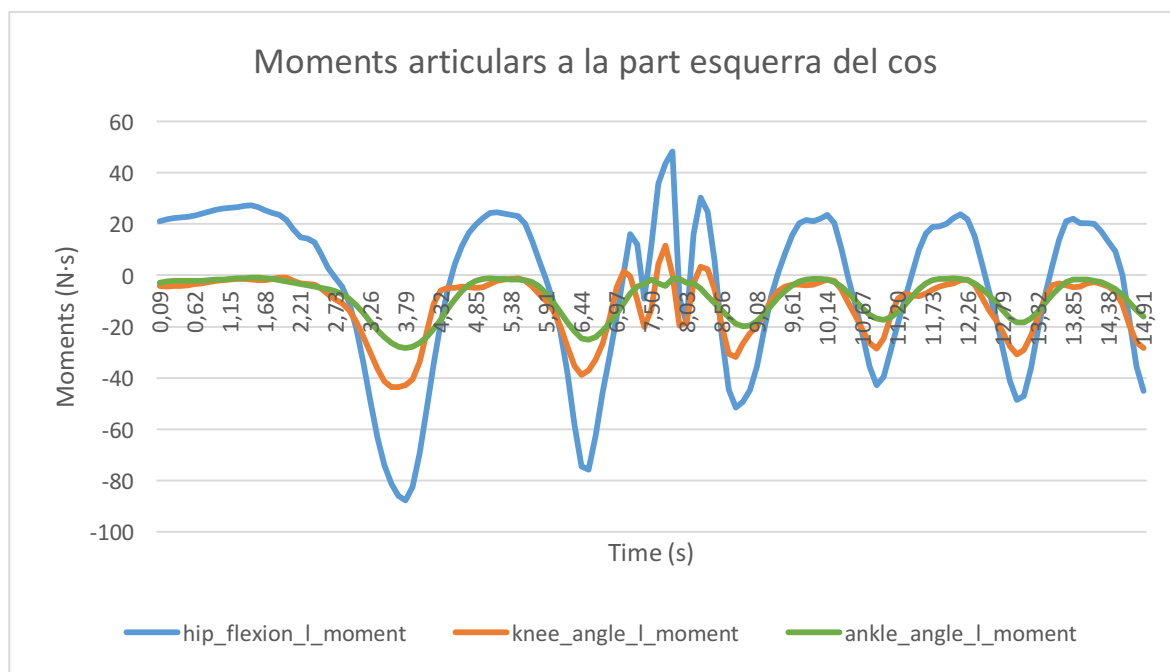


Figura 7.13. Moments articulars per una cadència baixa.

Per una cadència progressiva, es pot veure la gràfica que apareix a la Figura 7.14. Igual que passa per una velocitat de pedaleig constant, els moments articulars més elevats es produeixen als malucs. En els tres moments articulars, s'aprecia el pedaleig quan la cama està fent força i quan està recuperant la posició.

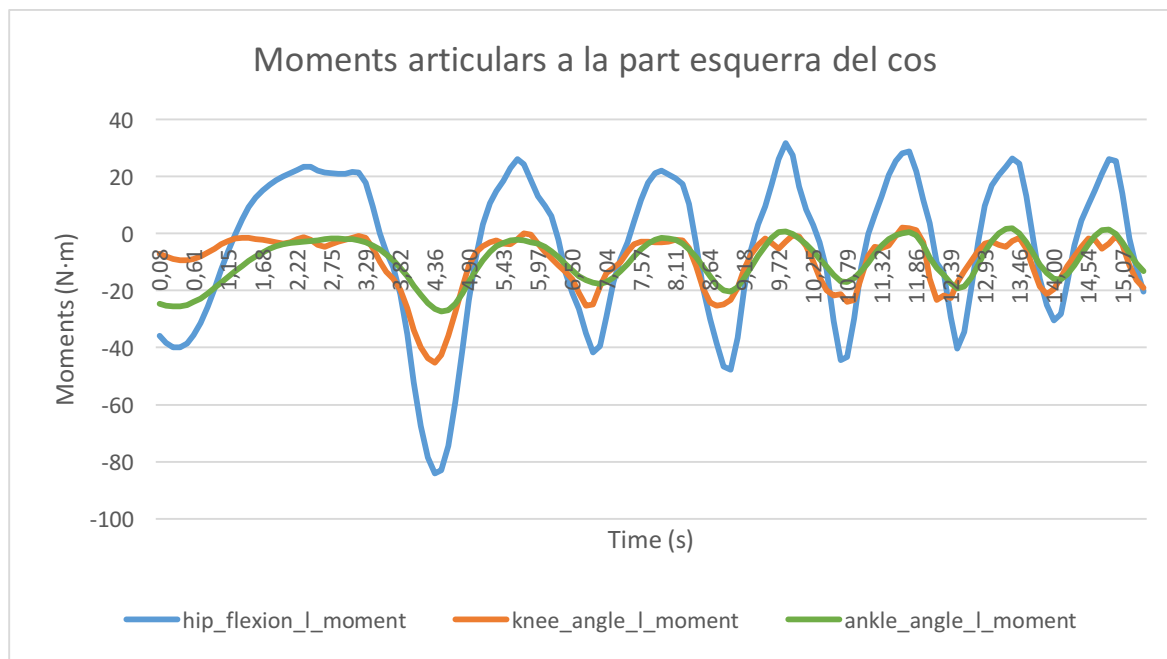


Figura 7.14. Moments articulars per una cadència progressiva.

En el cas d'una cadència ràpida, els moments articulars que es produeixen es poden veure a la Figura 7.15. S'aprecia que la velocitat de pedaleig és més alta. Els moments articulars més grans segueixen produint-se als malucs. A la Figura 7.16., es pot veure l'oscil·lació del pedaleig en el cas dels malucs, els moments més elevats es produeixen quan la cama produeix la força per portar a terme el pedaleig.

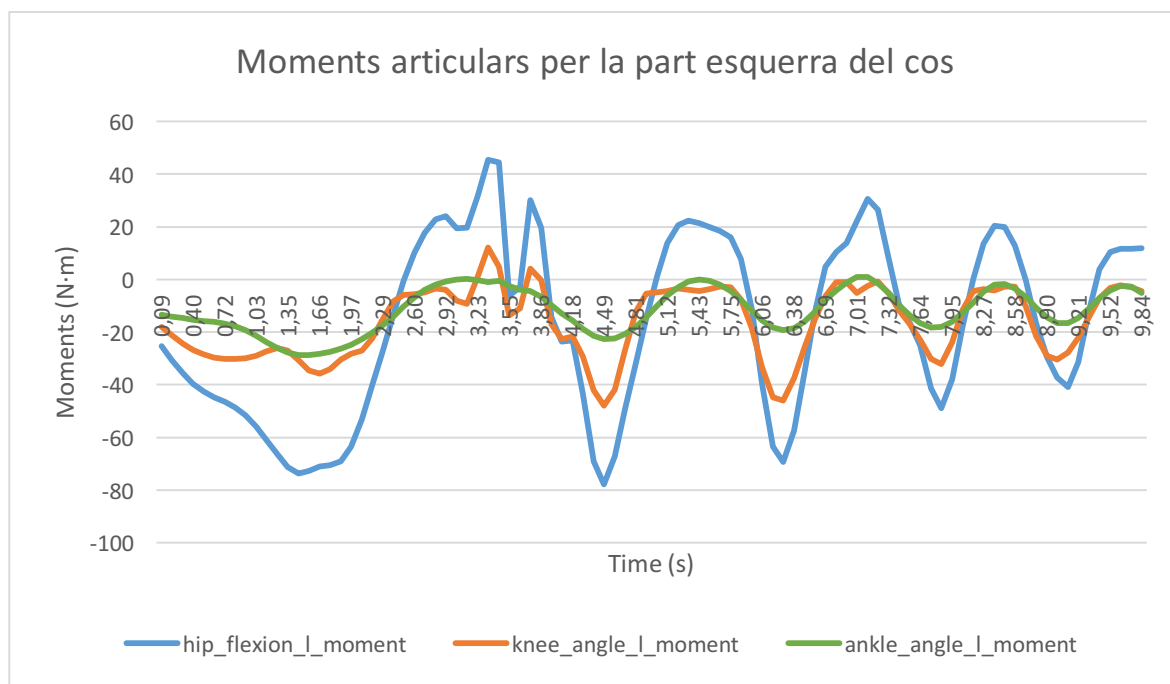


Figura 7.15. Moments articulars per una cadència ràpida.

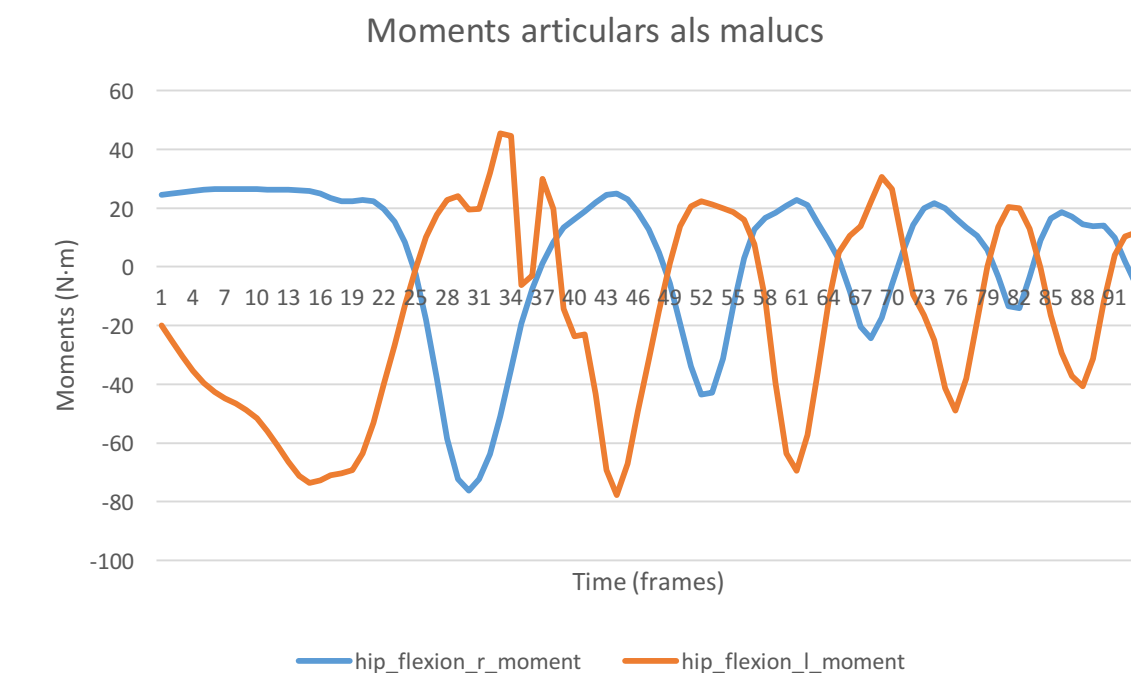


Figura 7.16. Moments articulars als dos malucs.

Conclusions

En aquest treball de fi de grau s'han mesurat de forma experimental les forces de contacte als pedals i al seient d'un ciclista. Amb el valor de les forces s'ha pogut extreure el valor dels moments articulars que es produeixen en pedalejar mitjançant una anàlisi dinàmica inversa.

S'ha requerit d'un temps de familiarització amb el programari utilitzat, el MATLAB i l'OpenSim, amb els quals s'ha realitzat tot el processament de les dades cinemàtiques. També amb el funcionament i disseny del circuit d'electrònica realitzat amb les plaques d'Arduino i els sensors de força de Tekscan que han permès realitzar l'adquisició de les dades.

S'ha aconseguit que el sistema mesuri de forma correcta el valor de les forces de contacte en una captura estàtica. En aquest cas, la suma de totes les forces de contacte és pràcticament igual al pes del subjecte que realitza l'estudi. Conseqüentment, tenint un resultat de les forces de contacte acurat, l'estudi de la dinàmica inversa també ha ofert bons resultats.

Durant el treball han anat sorgint alguns problemes, principalment relacionats amb el funcionament de l'electrònica i amb el disseny dels suports per posar els sensors. Tots però, s'han pogut solucionar mitjançant la realització de diferents proves i reunions amb el tutor.

Una conclusió que se'n pot treure una vegada el treball està acabat, és que el sensor 1 (sensor davanter del seient), seria prescindible per les mesures que s'han realitzat. Aquest sensor no és necessari si analitzem el moviment amb aquesta posició, ja que el ciclista recolza els glutis a la part de darrera del seient i simplement el que llegeix el sensor 1 és un valor molt petit produït pel mateix moviment. Caldria fer proves en més subjectes per tal de veure si per altres subjectes, aquest sensor també és prescindible.

La principal aportació d'aquest treball és la realització i disseny de tot el sistema d'adquisició i processament de les dades. Es va comprovar el funcionament d'aquest sistema amb un únic ciclista amateur. A continuació es citen propostes de futur per poder contribuir d'una forma significativa amb la millora del rendiment dels ciclistes.

En primer lloc, es podria realitzar un estudi amb diferents atletes de diferent nivell esportiu amb diferents càrregues de treball i diferents cadències de pedaleig i així poder realitzar una comparació de com varien les forces de contacte i els moments articulars en funció del rendiment de l'esportista.

En segon lloc, es podria elaborar i dissenyar un sistema que capturés també les forces de contacte que exerceixen els braços del ciclista al recolzar-los sobre el manillar de la bicicleta i així, realitzar un estudi de la dinàmica inversa més real amb la posició que es realitza el pedaleig generalment.

En tercer lloc, una possible aplicació seria la realització d'un estudi a un grup nombrós d'atletes i crear un model matemàtic (per exemple utilitzant xarxes neuronals) que simplement introduint les dades cinemàtiques, pogués realitzar una estimació de la dinàmica inversa i així poder conèixer els moments articulars d'una forma bastant acurada, sense haver de mesurar les forces de contacte.

Seguint aquesta línia d'investigació, es podria realitzar un projecte d'una envergadura molt més gran per poder realitzar un treball que tingues projecció a la vida real. Per poder portar-lo a terme, s'haurien de millorar alguns aspectes.

El primer que s'hauria de millorar és la integració del sistema d'electrònica en un únic dispositiu sense cables (*wireless*) mitjançant un sistema de *Bluetooth* o similar, ja que el muntatge del sistema a nivell experimental és bastant laboriós. També s'hauria d'integrar la sincronització de les dues Arduino en un sol ordinador o dispositiu.

L'altre aspecte que s'hauria de millorar és a nivell de programari. No tothom pot disposar del MATLAB per realitzar les proves. S'hauria de dissenyar una aplicació que permetés que des de qualsevol dispositiu es pogués realitzar l'adquisició de les dades i disposar d'aquestes.

Si es poguessin realitzar totes aquestes millores, les quals requereixen una inversió de temps molt gran, aquest projecte podria ser d'un gran interès pel món del ciclisme professional. Els equips podrien disposar dels moments articulars pràcticament a temps real i en podrien treure partit, tant a nivell de rendiment com a nivell de rehabilitació en casos de lesions.

Abans de començar a invertir-hi temps, s'hauria de realitzar un estudi de mercat i valorar si els equips estarien disposats a dotar-se d'aquest sistema per treballar amb els ciclistes professionals. També es podria valorar si a nivell amateur, hi hauria interès en comprar el sistema. Per poder realitzar l'estudi, s'hauria de mirar si a nivell econòmic hi hauria possibilitats de realitzar alguna col·laboració o disposar d'alguna beca o subvenció per finançar-lo.

Per acabar, els resultats d'aquest estudi són satisfactoris i en un futur, podria ser interessant poder seguir treballant en aquest projecte i poder convertir aquest experiment en una realitat.

Anàlisi Econòmica

Per realitzar l'anàlisi econòmica del treball, s'han tingut en compte diferents aspectes. D'una banda, la depreciació dels equips que s'han emprat per portar a terme el projecte. Per altra banda, la utilització dels programaris necessaris els quals requereixen una llicència, en aquest cas, el MATLAB i dels materials que es van haver de comprar per portar-lo a terme. Per la part dels equipaments, s'han utilitzat dos ordinadors personals, l'ordinador principal (el de l'alumne) i l'ordinador auxiliar, el del tutor del treball.

Per estimar la depreciació dels equipaments i programaris, es valora el preu total dels mateixos, la seva vida útil i de les hores que s'han invertit realitzant el projecte. La vida útil dels equips aproximadament es pot estimar de la següent forma: 12 hores de jornada d'utilització diàries, durant 5 dies a la setmana i 48 setmanes hàbils durant un any. D'aquest càlcul resulten 2880 hores a l'any d'ús. Pel programari de MATLAB, la jornada d'utilització que s'ha valorat és de 24 hores al dia durant 7 dies a la setmana durant 52 setmanes que hi ha en un any. En aquest cas, resulten 8736 hores.

Referent a les hores invertides per l'estudiant en portar a terme el projecte, s'han invertit al voltant de 150 hores de treball de camp al laboratori, 200 hores de treball amb l'ordinador personal i 150 hores invertides per realitzar la recerca bibliogràfica, la presa de decisions, reunions amb el tutor i el cotutor, presa de decisions i reflexions referents a la realització del treball.

Considerant que l'hora de treball d'un enginyer s'hauria de pagarà 30€/h, la remuneració per la realització del treball seria de $30€/h \cdot 500h = 15.000€$.

Respecte a les hores que ha invertit el tutor del treball, es fa una estimació entre les hores invertides en fer les proves, reunions i correccions. Aquesta aproximació és d'unes 30 hores, a 30€/hora són 900€.

Concepte	Vida útil [h]	Cost variable [€/h]	Temps [h]	Cost total [€]	Cost del projecte [€]
MATLAB	8736	0,0572	75	500	4,29
Ordinador personal	2880	0,521	200	1500	104,17
Ordinador auxiliar	2880	0,694	30	2000	20,8
Arduino UNO	-	-	-	25,41	25,41
Arduino DUE	-	-	-	38,62	38,62
FlexiForce (x7)	-	-	-	244,3	244,3
Supervisors	-	30	30	900	900
Estudiant	-	30	500	15.000	15.000
TOTAL					16.337,59€

Anàlisi de l'impacte ambiental

L'impacte ambiental d'aquest treball es pot considerar lleu, ja que no s'ha generat cap residu que sigui considerable a nivell ambiental. Els únics residus que s'han generat són els adhesius de color que s'han utilitzat durant la realització de les proves. Per cada dia de proves s'utilitzaven 10 marcadors diferents que, en finalitzar estaven deteriorats i s'havien de llençar. Es van realitzar tres dies de proves, per tant s'estima que s'han llençat uns 30 adhesius. D'altra banda, es van fer els suports amb llistons de fusta, que es podran reutilitzar per continuar amb propostes de millora del treball, fins que es deteriorin d'una forma més severa.

La despesa energètica que s'ha generat per portar a terme el treball és difícil de quantificar. Tot i que s'han endollat els portàtils a la corrent, la majoria d'equips utilitzats són electrònics, no es considera que el desenvolupament del treball hagi suposat un augment considerable en el consum energètic de l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est.

Es podria produir un impacte ambiental una mica més significatiu si es produís un lot d'un nombre de sistemes més elevat, per exemple d'uns 1000 sistemes. Tot i que en el cas de que s'haguessin de produir, s'haurien de replantejar els materials emprats per fabricar el sistema. Per exemple, s'hauria de pensar amb un altre sistema per posar els marcadors que fos reutilitzable per diferents proves, amb la qual cosa aquest residu ja no es generaria. Tal i com s'ha indicat a les conclusions, s'hauria de repensar el muntatge del sistema i consegüentment els materials per tal de que no sigui tan complex.

Pel que fa al deteriorament dels equips electrònics, aquest grup inclou els ordinadors, els sensors de força, el sistema de captura, etc. cal tenir-los presents i un cop deixin de ser útils i s'hagin amortitzat, caldrà seguir les normes de tractament de residus dictades per la Unió Europea.

8. Bibliografia

- [1] Ericsson, M. &, & Ericsson, M.O. & Nissell, R. (1988). Efficiency of pedal forces during ergometer cycling. *International Journal of Sports Medicine* , 118-122.
- [2] Stapelfeldt, B. M. (2007). Development and evaluation of a new bicycle instrument for measurements of pedal forces and power output in cycling. *International Journal of Sports Medicine* , 326-332.
- [3] Ericson, M. O., & Ericson, M. O., Nisell, R., Arborelius, U. P., & E. (1985). Muscular activity during ergometer cycling. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine* , 53-61.
- [4] Erdemir A1, M. S., & Erdemir A1, McLean S, Herzog W, van den Bogert AJ. (2007). Model-based estimation of muscle forces exerted during movements. *Clinical biomechanics* , 131-154.
- [5] Delp, S., Anderson, F., Arnold, A., Loan, P., Habib, A., & John, C. et al. (2007). OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement. *IEEE Transactions On Biomedical Engineering*, 54(11), 1940-1950. doi: 10.1109/tbme.2007.901024
- [6] Sherman, M., Seth, A., & Delp, S. (2011). Simbody: multibody dynamics for biomedical research. *Procedia IUTAM*, 2, 241-261. doi: 10.1016/j.piutam.2011.04.023

Annex A

Annex 1 i 2 → Vídeo a cadència constant amb les mans agafades al manillar.

Annex 3 → Vídeo a cadència constant sense les mans agafades al manillar.

Annex 4 → Vídeo amb cadència ràpida sense les mans agafades al manillar.